

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

Optimalizace veřejné dopravy Rýmařovska

**Optimization of Public Transport Network in the Rýmařov Micro
Region**

Student:

Bc. Kateřina Lašáková

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

Ostrava 2015

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Kateřina Lašáková**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T003 Dopravní technika a technologie
Specializace: 30 Technologie dopravy
Téma: **Optimalizace veřejné dopravy Rýmařovska**
Optimization of Public Transport Network in the Rýmařov Micro Region

Zásady pro vypracování:

1. Úvod - motivace k řešení úlohy
2. Charakteristika stávajícího rozsahu veřejné dopravy a problémy z něho vyplývající
3. Teoretická východiska řešení - charakteristika možných přístupů
4. Návrh změn v dopravní obsluze
5. Zhodnocení dosažených výsledků
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

Černý, J.; Kluvánek, P.: Základy matematické teorie dopravy. Bratislava: VEDA, 1990. ISBN 80-224-0099-9
Pastor, O.; Tuzar, A.: Teorie dopravních systémů. Praha: ASPI, 2007. ISBN 978-80-7357-285-3

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015



doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 18. 5. 2015

..... Křáteková B.

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byla seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a 60 – školní dílo,
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít
- (§ 35 odst. 3),
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO,
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 18.5.2015

Kateřina L.
.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Kateřina Lašáková

Adresa trvalého bydliště autora práce: Tovární, 338, Ryžoviště, 793 56

Poděkování

Ráda bych tímto způsobem poděkovala svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Dušanu Teichmannovi, Ph.D. za jeho cenné rady, čas a trpělivost při konzultacích diplomové práce.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

LAŠÁKOVÁ, K. *Optimalizace veřejné dopravy Rýmařovska*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2015. 75 s. Vedoucí práce: Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

Diplomová práce se věnuje optimalizaci veřejné dopravy Rýmařovska. Úvodní kapitoly diplomové práce popisují řešený problém dopravní situace a charakteristiku matematického programování. Těžiště diplomové práce spočívá v kapitole 5, ve které je navržen matematický model, jehož úkolem je optimalizovat – počet nasazených vozidel do oběhu, celkovou časovou ztrátu cestujících a neproduktivně ujetou vzdálenost. Funkčnost matematického modelu je zkoumána provedenými experimenty. V poslední kapitole práce je provedeno zhodnocení výsledků výpočetních experimentů.

Klíčová slova: optimalizace, matematické programování, veřejná doprava, oběhy vozidel, časová koordinace.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

LAŠÁKOVÁ, K. *Optimization of Public Transport Network in the Rýmařov Micro Region*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Transport, 2015, 75 p. Thesis head: Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

The thesis deals with optimization of public transportation system in region of Rýmařov. The first few chapters describe the problematic transport situation in the region and mathematical programming methods. The core of the thesis lies in chapter five - mathematical model design that serves to optimize number of vehicles operating the lines, total passenger waiting time and ineffective distance driven. The function of the mathematical model is examined by experiments. The last chapter evaluates the results of these experiments.

Keyword: optimization, mathematical programming, public transport, scheduling of vehicles, time coordination.

OBSAH

1	ÚVOD	9
2	OBECNÁ CHARAKTERISTIKA PROBLÉMU	11
2.1	FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VÝŠI EKONOMICKÉ ZTRÁTOVOSTI A NÁKLADOVOSTI VEŘEJNÉ OSOBNÍ DOPRAVY	13
2.2	MOŽNOSTI ODSTRANĚNÍ PŮSOBNÍ NEGATIVNÍCH FAKTORŮ	14
2.3	DÍLČÍ ZÁVĚR	15
3	ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU DOPRAVNÍ OBSLUŽNOSTI RÝMAŘOVSKA V ŘEŠENÉM OBDOBÍ	17
3.1	INFRASTRUKTURA VEŘEJNÉ HROMADNÉ DOPRAVY V MIKROREGIONU	18
3.2	CHARAKTERISTIKA STÁVAJÍCÍHO ROZSAHU VEŘEJNÉ DOPRAVY	19
4	TEORETICKÁ VÝCHODISKA ŘEŠENÍ	23
4.1	STRUČNÁ ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ V OBLASTI OPTIMALIZAČNÍCH METOD	23
4.2	PRAVIDLA PRO TVORBU LINEÁRNÍCH MODELŮ	23
4.3	ZÁKLADNÍ POPIS SOFTWARE XPRESS-IVE	25
4.3.1	Zásady transformace matematického modelu do jazyku MOSEL	26
4.4	ČASOVÁ KOORDINACE SPOJŮ V UZLECH DOPRAVNÍ SÍTĚ	29
4.4.1	Původní model časové koordinace	29
4.5	OPTIMALIZACE OBĚHŮ VOZIDEL	31
4.5.1	Model oběhů vozidel v podmínkách homogenního vozidlového parku bez možnosti časových posunů spojů	32
4.5.2	Model oběhů vozidel v podmínkách homogenního vozidlového parku s možností časových posunů spojů	33
5	NÁVRH MATEMATICKÉHO MODELU	35
6	VÝPOČTY SOUVISEJÍCÍ S OVĚŘENÍM FUNKČNOSTI MODELU	39
6.1	ZADÁNÍ PRVNÍHO OVĚŘOVACÍHO EXPERIMENTU	39
6.2	TEXT PROGRAMU PRVNÍHO OVĚŘOVACÍHO EXPERIMENTU V PROGRAMU XPRESS-IVE	39
6.3	VÝSLEDKY VÝPOČTU PRVNÍHO EXPERIMENTU	42
6.4	ZADÁNÍ DRUHÉHO OVĚŘOVACÍHO EXPERIMENTU	43
6.5	TEXT PROGRAMU DRUHÉHO OVĚŘOVACÍHO EXPERIMENTU V PROGRAMU XPRESS-IVE	44
6.6	VÝSLEDKY VÝPOČTU DRUHÉHO OVĚŘOVACÍHO PŘÍKLADU	49
7	PŘÍPADOVÁ STUDIE	52
7.1	PODKLADY PRO OPTIMALIZAČNÍ VÝPOČET	55
7.2	TEXT PROGRAMU	56
7.3	VÝSLEDKY VÝPOČTU PŘÍPADOVÉ STUDIE	62
7.4	POSOUZENÍ VLIVU ZVĚTŠENÍ MAXIMÁLNÍHO DOVOLENÉHO POSUNU AUTOBUSOVÝCH SPOJŮ NA POUŽITÝ POČET VOZIDEL	65
7.5	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	70

8	ZÁVĚR.....	72
9	POUŽITÁ LITERATURA	73
	SEZNAM OBRÁZKŮ	74
	SEZNAM TABULEK.....	75

1 ÚVOD

Veřejná hromadná doprava je doprava provozovaná za předem určených a vyhlášených přepravních a tarifních podmínek a musí být adekvátně přístupná všem občanům daného státu. Provozování veřejné dopravy přináší jak pro občany, tak i pro územní samosprávné celky celou řadu výhod. Pro občany je to např. cenově výhodné cestování mezi zdroji a cíli jejich cest, pro územní samosprávné celky např. skutečnost, že do jisté míry omezí používání individuální automobilové dopravy, sníží zatížení dopravní sítě a zatížení životního prostředí negativními průvodními jevy dopravy. Bohužel, pozitiva uvedená v předchozí větě přinášejí s sebou i určité nevýhody. Pro cestující má využívání veřejné hromadné dopravy zpravidla za následek především vyšší časovou náročnost na přepravu, snížení komfortu přepravy např. v úrovni komfortu, možnosti přerušit cestu v libovolném místě apod.

Aby veřejná doprava byla pro cestující dostatečně atraktivní, je potřeba, aby splňovala určitá kritéria. V dopravních prostředcích musí být dostatečná kapacita a komfort, nejdůležitější však je dostatečné územní pokrytí a rozložení nabídky spojů v čase, akceptovatelná cestovní rychlost a v neposlední řadě také návaznosti mezi spoji různých linek v relacích, které přímými spojeními nejsou obsluhovány.

Jak již bylo uvedeno v předchozím odstavci, jednou z nevýhod veřejné dopravy je nutnost přestupovat. Cestující musí přestupovat především proto, že v dopravním systému není realizovatelné a často ani reálné nabízet přímá spojení mezi každým výchozím a cílovým místem přepravy. Přestupování cestujících nese určité nežádoucí jevy. Zvyšuje se nepohodlí spojené se změnou dopravního prostředku často doprovázeného také nutným přesunem pěšky mezi výstupním stanovištěm a nástupním stanovištěm navazujícího spoje ve frekventovaných přestupních uzlech a případným delším čekáním na odjezd navazujícího spoje, protože ne vždy lze dopravní procesy zkoordinovat tak, aby na sebe bezprostředně navazovaly.

Předložená práce si klade za cíl věnovat se problematice zvyšování efektivity a atraktivnosti veřejné hromadné dopravy na území zvoleného mikroregionu a časovém období v průběhu dne. Zvyšováním efektivity se rozumí odstraňování nepohodlí spojeného s čekáním cestujících při přestupech a také zvýšení využití dopravních prostředků použitých při obsluze naplánované množiny spojů. K řešení obdobných problémů byly v minulosti využívány různé exaktní přístupy, které s různou mírou úspěšnosti nabízejí

potenciál pro řešení tohoto typu problémů. Lze uvést, že hledáním exaktních řešení se v minulosti zabývala a v současnosti zabývá celá řada pracovníků výzkumných institucí a vysokých škol. Na území bývalého Československa mají v oblasti rozvoje exaktních přístupů zásluhy zejména tým pedagogů působící na Fakultě managementu v Jindřichově Hradci Vysoké školy ekonomické v Praze vedený prof. RNDr. Janem Černým, DrSc., Dr. h. c., nebo týmy pedagogů z Fakulty riadenia a informatiky Žilinské univerzity v Žilíně vedené prof. RNDr. Jaroslavem Janáčkem, CSc. a doc. RNDr. Stanislavem Palúchem, CSc..

Problematika hledání exaktních přístupů se v minulosti rozvíjela také na Institutu dopravy Fakulty strojní VŠB-TU Ostrava, který výše uvedené poznatky aplikuje v podmínkách konkrétních dopravních podniků, a na kterém byla v minulosti úspěšně obhájena celá řada kvalifikačních prací. Lze tedy do jisté míry navázat na dosažené zkušenosti navázat a tyto poznatky dále rozvíjet.

Předmětem předložené diplomové práce tedy bude aplikace exaktních přístupů zaměřených na zvyšování atraktivity a efektivity veřejné hromadné dopravy. Zvyšování atraktivity veřejné dopravy bude provedeno prostřednictvím zvyšování míry koordinace autobusových a vlakových spojů obsluhujících řešené území v definované denní době. Zvyšování efektivity veřejné dopravy bude probíhat prostřednictvím snižování počtu autobusů potřebného k obsluze zadaných spojů.

Oba typy problémů – koordinace spojů a plánování oběhů vozidel nasazených k jejich obsluze byly již v minulosti řešeny, ovšem odděleně. Uvedená skutečnost vyplývá z toho, že i v praxi se uvedené fáze přípravy jízdního řádu realizují odděleně. V první fázi se navržené spoje nejdříve zpravidla umístí v čase a zkoordinují v přestupních uzlech a ve druhé fázi se následně naplánují oběhy vozidel. Předkládaná práce si klade za cíl najít přístup, kterým bude možno realizaci obou těchto fází přípravy jízdního realizovat v rámci jednoho optimalizačního výpočtu.

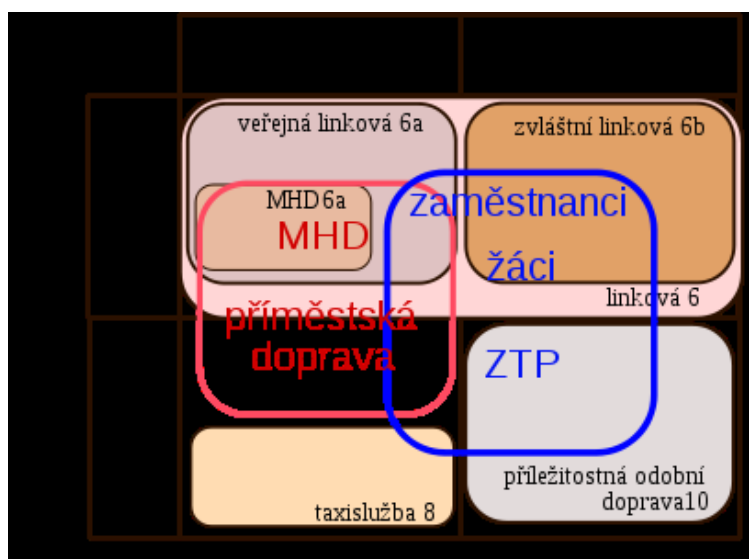
Prostředkem pro optimalizaci systému veřejné hromadné dopravy bude matematické programování. Bude snaha vytvořit takový matematický model, pomocí kterého bude dosaženo požadovaných efektů. Funkčnost matematického modelu bude otestována na mikroregionu Rýmařovska. Vzhledem k rozsahu řešeného problému bude pozornost v diplomové práci omezena na optimalizaci v dopravním sedle pracovního dne.

2 OBECNÁ CHARAKTERISTIKA PROBLÉMU

Hromadná osobní doprava plní ze společenského hlediska celou řadu úkolů. Hlavním posláním hromadné osobní dopravy je zabezpečení přepravy větších počtů osob na krátké, střední, ale i dlouhé přepravní vzdálenosti, snížení negativních následků individuální automobilové dopravy na životní prostředí cestou úspory energií, produkovaných exhalací apod.

Hromadnou osobní dopravu můžeme kategorizovat z celé řady hledisek – např. Zákon č. 111/1994 Sb., ve znění pozdějších předpisů (dále jen „zákon“), kategorizuje veřejnou hromadnou dopravu z hlediska okruhu jejích uživatelů nebo z hlediska její realizace v určitých relacích. Z hlediska okruhu zákon rozlišuje hromadnou osobní dopravu veřejnou a neveřejnou, z hlediska realizace hromadné osobní dopravy v určitých relacích potom rozlišuje hromadnou osobní dopravu pravidelnou a nepravidelnou.

Jednotlivé kategorie hromadné osobní dopravy ve smyslu zákona je možno vidět na obrázku 2.1.



Obr. 2.1 Rozdělení hromadné dopravy [9]

V dalším textu bude pozornost věnována již jen jedné z uvedených čtyř kategorií, a to veřejné linkové dopravě, kterou ve smyslu zákonem uvedené kategorizace lze definovat jako pravidelnou veřejnou hromadnou osobní dopravu (dále jen „veřejná osobní doprava“).

Veřejná osobní doprava je služba provozovaná na základě smluvního vztahu, kdy smluvními stranami je dopravce (v roli subjektu nabízejícího službu) a objednavatel (v roli subjektu poptávajícího službu). Zatímco identifikace subjektu na straně nabízející

službu může být poměrně jednoznačná (je to každý subjekt, který vlastní příslušné oprávnění k provozování daného typu služby), identifikace subjektu na straně poptávající službu vyžaduje další komentář. Objednavatelů totiž může být více typů. Konkrétní objednavatel se odvíjí od vymezení území, na kterém je poskytnutí služby požadováno. Existují relace, které jsou svým významem celostátní a existují relace svým významem lokální, tzn. nabízené na území jednoho samosprávného celku, v tomto případě kraje. Jedná-li se o relaci celostátního významu, je objednavatelem v podmínkách České republiky Ministerstvo dopravy, jedná-li se o relaci lokálního významu ve smyslu předchozího textu, je objednavatelem krajský úřad příslušného kraje.

Charakteristickým rysem veřejné osobní dopravy je objektivní nemožnost pokrytí vzniklých nákladů z tržeb z jízdného. Z uvedeného objektivního předpokladu vyplývá povinnost objednavatelů služeb v rámci systémů veřejné osobní dopravy, dotovat v uzavíraných smlouvách o zajištění dopravní obslužnosti prokazatelnou ztrátu, která dopravcům vzniká při realizaci sjednaných služeb. Obecně platí, že financování prokazatelné ztráty tvoří zásadní položkou v rozpočtu příslušného objednavatele.

Aby financování veřejné hromadné osobní dopravy bylo opodstatněné, je nutné, aby po nabízené službě existovala reálná poptávka, což lze mimo jiné ovlivnit i tím, že nabídka veřejné hromadné dopravy musí být pro potenciální zájemce dostatečně atraktivní.

Atraktivitu systému veřejné osobní dopravy lze ovlivnit po stránce technické, technologické i ekonomické. Ovlivnění po stránce technické spočívá v tom, že bude nabízeno spojení dostatečně rychlé, bezpečné a pohodlné. Ovlivnění po stránce technologické spočívá v tom, že bude nabízeno spojení pokud možno přímé, v případě nevhodnosti přímého spojení (nižší intenzita cestujících v dané relaci) bude nabízeno spojení, při kterém bude nutno přestupovat minimálně, a při přestupech nebudou vznikat velké časové prodlevy. Ovlivnění po stránce ekonomické spočívá především v nastavení akceptovatelné tarifní politiky, např. nastavení degresivního tarifu s rostoucí přepravní vzdáleností, akceptace přepravních dokladů vydaných jedním dopravcem větším počtem spolupracujících dopravců, přístupností zakoupení jízdního dokladu on-line apod.

Zvláštní odstavec vyžaduje kategorie – „spolehlivost systému veřejné osobní dopravy“. Spolehlivost totiž nelze pojmut jako charakteristický rys pouze jedné z uvedených stránek, ale může být chápána průřezově, nejčastěji však v úrovni technické

a úrovni technologické. V technické úrovni je spolehlivost chápána zpravidla jako provozuschopnost dopravních prostředků, v technologické úrovni je zpravidla chápána jako dosažitelnost cílového místa cesty v požadované době.

Kromě všech výše uvedených stránek ovlivňujících atraktivitu veřejné osobní dopravy je důležité zabývat se kontinuálně také zefektivňováním systému veřejné dopravy, zejména zvyšováním hospodárnosti vlastního provozu (např. odstraňováním zbytných nákladových položek v základních a souvisejících procesech, využíváním palivově méně náročných dopravních prostředků a systémů šetrných k životnímu prostředí, tzn. hledáním úspor v interních i externích nákladech dopravního procesu) a také lepší organizací celého provozu systému.

V dalším textu bude pozornost věnována vybraným faktorům ovlivňujícím výši ekonomické ztrátovosti. Dlužno podotknout, že se bude jednat o faktory věcně ovlivňující ve větší míře interní náklady dopravy, v menší míře potom externí náklady dopravy (např. úspora paliva spotřebovaného v rámci jízdy vyvolá také úsporu vyprodukovaných exhalací).

2.1 Faktory ovlivňující výši ekonomické ztrátovosti a nákladovosti veřejné osobní dopravy

Ekonomickou ztrátovost veřejné dopravy ovlivňuje celá řada faktorů. Na základě provedené analýzy vyplývá, že významnými faktory ovlivňujícími výši ekonomické ztrátovosti veřejné dopravy jsou především:

- nízká frekvence spojů v jednotlivých trasách,
- značná územní rozptýlenost výchozích a cílových zastávek spojů,
- počet nasazených vozidel.

První dva z uvedených faktorů jsou důsledkem chování vnějšího prostředí, poslední z uvedených faktorů lze potom označit jako faktor, který je jejich důsledkem. Uvedený výčet hlavních faktorů nelze, samozřejmě, chápat jako vyčerpávající, omezuje se pouze na faktory, kterým bude pozornost věnována v předložené práci.

Prvním faktorem ztrátovosti veřejné osobní dopravy je nízká frekvence spojů na linkách. Nízký počet spojů, zejména v dopravních sedlech (a naopak vysoký počet spojů naplánovaných v dopravních špičkách), vzniká vlivem časové nerovnoměrnosti poptávky v průběhu dne. Obyvatelstvo zpravidla vyžaduje služby veřejné osobní dopravy

při cestách za prací, za vzděláním, k lékaři apod. přičemž začátky a konce pracovní doby, školního vyučování apod. bývají koncentrovány do společných denních období.

Značná územní rozptýlenost z pohledu výchozích a cílových zastávek spojů je dalším charakteristickým rysem veřejné osobní dopravy, protože zdroje a cíle cest (umístění podniků, vzdělávacích zařízení a míst bydlišť obyvatelstva) bývají také územně značně rozptýleny.

Časová nerovnoměrnost poptávky po přepravě společně s územní rozptýleností zdrojů a cílů cest jsou klíčovými faktory přímo ovlivňující vznik třetího faktoru – počet vozidel potřebných k uspokojení poptávky po přepravě a z toho plynoucího nízkého využívání vozidel v průběhu dne.

Počet použitých vozidel se pochopitelně negativně promítá do ekonomiky celého systému. Když bude potřeba k obsluze naplánovaných spojů zbytečně velký počet vozidel, porostou náklady na fungování celého systému, protože každé vozidlo navíc systém neúměrně zatíží po ekonomické stránce. Aby bylo možno zajistit bezproblémové financování celého systému, začne být v uvedených situacích vyvíjen tlak na zvyšování příjmů a to buď cestou na zvyšování cen jízdného pro cestující, nebo na zvýšení objemu dotací ze strany rozpočtů výše uvedených objednavatelů. Zvýšení cen jízdného pro cestující může mít za následek ztrátu atraktivitu veřejné hromadné dopravy, protože se odstraní jedna z klíčových výhod veřejné hromadné dopravy (cenová dostupnost). Požadavek na zvyšování dotací za účelem vybilancování prokazatelné ztráty pak může přinést snížení disponibilních prostředků pro ostatní dotované aktivity v rámci veřejných rozpočtů (zdravotnictví a sociální péče, školství, odpadové hospodářství apod.). Z uvedeného důvodu je proto zapotřebí, aby cesta zvyšování cen jízdného a požadavku na dotace ze strany veřejných rozpočtů byla až na posledním místě v pořadí možných řešení.

2.2 Možnosti odstranění působení negativních faktorů

Možnosti odstranění působení faktorů ovlivňující vysokou nákladovost, a tedy i neefektivnost veřejné osobní dopravy jsou často velice omezené. Odstraňování neefektivnosti je možno realizovat snižováním působení výše uvedených negativních faktorů.

Protože organizátoři systému veřejné hromadné dopravy mohou jen zřídka a velice obtížně ovlivnit faktory jako jsou územní rozptýlenost zdrojů a cílů cest a časové rozložení poptávky v průběhu dne, tedy vnější faktory, zůstává hlavní možností snižování nákladovosti veřejné osobní dopravy odstraňování neefektivity uvnitř systému. Jednou z cest, jak odstraňovat neefektivnost uvnitř systému je minimalizace počtu vozidel potřebných k zabezpečení obsluhy naplánovaných spojů. Minimalizace počtu použitých vozidel vede nejen ke zvyšování využití použitých vozidel, ale také zvýšení využití obslužného personálu (řidičů) a dále také k možnému snížení dalších nákladů (potřeba parkovacích stání, vybavení údržbové základny apod.). Zvyšovat využití vozidel umožňují také možné změny časových poloh spojů. Prostřednictvím posunů spojů dochází alespoň částečně k časově většímu rozložení přepravní poptávky.

To je samozřejmě přípustné v situacích, kdy není z nějakých objektivních důvodů striktně vyžadováno dodržení časové dostupnosti cílů cest (např. začátek pracovní směny, školního vyučování apod.) a tedy navržené časové polohy spojů. Je možno konstatovat, že čím větší je manévrovací prostor pro časové posuny spojů, tím větší úspory v oblasti počtu vozidel se dají očekávat. Z uvedeného však také vyplývá, že i cesta snižování počtu vozidel potřebných k obsluze spojů má své limity. Ty vycházejí zejména ze skutečnosti, že některé spoje se mohou časově překrývat nebo mohou být časově umístěny tak, že přejezdy vozidel mezi nimi nebudou časově přípustné.

Je-li možno poptávku po přepravě alespoň částečně rozložit v průběhu dne a existuje-li požadavek na snižování počtu vozidel potřebných k obsluze množiny naplánovaných spojů, je možno při zpracování jízdních řádů nařídit, aby vozidla po obsluze spoje v relaci, ve které by na konečné zastávce po skončení obsluhy spoje dané relace a před zahájením obsluhy následujícího spoje vznikl značný prostoj, tuto cílovou konečnou zastávku opustila a přešla k obsluze spoje v jiné relaci. To má ovšem za následek vznik neproduktivně ujetých kilometrů.

Pokud opravdu existuje značná územní rozptýlenost výchozích a cílových konečných zastávek spojů dá se předpokládat, že se snižováním počtu vozidel potřebných k obsluze spojů poroste vlivem naplánovaných přesunů také neproduktivně ujetá vzdálenost.

2.3 Dílčí závěr

Řešení ztraktivnění veřejné dopravy v mikroregionu je možné hned několika způsoby. Klíčovým problémem každého dopravního systému je maximální snížení ekonomické

ztrátovosti. S uvedeným problémem velice souvisí efektivita nasazených vozidel a potřebného personálu.

Zvyšování efektivity systému veřejné hromadné dopravy je možné také cestou zvyšování atraktivity tohoto systému. To znamená vytvářet takovou nabídku spojů, která by cestující nutila přestupovat co nejméně, a když vzniká nezbytnost přestupů, tak aby nevznikaly cestujícím zbytečné časové ztráty. V omezené míře lze atraktivitu zvyšovat také odstraňováním územní rozptýlenosti spojů cestou slučování spojů. Přínosy je možno spatřovat v odstraňování neproduktivně ujeté vzdálenosti mezi spoji obsluhovanými týmž vozidlem a současně může být také dosaženo zlepšení dostupnosti vlivem odstranění případných přestupů a čekání na přípoje.

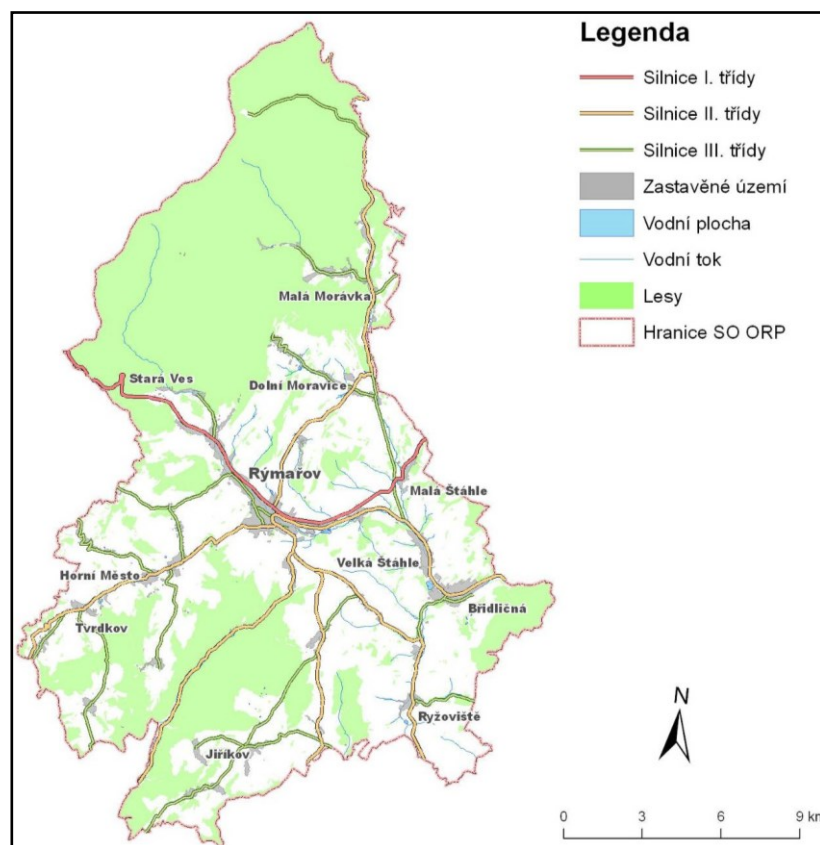
Problém výše definovaného problému lze exaktně řešit prostřednictvím kombinace dvou existujících lineárních modelů zabývajících se řešením problému časové koordinace spojů v uzlech dopravní sítě a problému optimalizace oběhů vozidel. Výsledky úlohy o časové koordinaci spojů mohou odstranit zbytečná čekání cestujících při přestupech. Výsledky úlohy o obězích vozidel (posloupnosti spojů obsluhovaných týmž vozidlem) mohou nejen minimalizovat počet použitých vozidel, ale mohou také ukázat na vhodná propojení některých spojů, případně prodloužení stávajících spojů.

3 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU DOPRAVNÍ OBSLUŽNOSTI RÝMAŘOVSKA V ŘEŠENÉM OBDOBÍ

Mikroregion Rýmařovsko se nachází v západní části Moravskoslezského kraje a v jedné z turisticky nejatraktivnějších oblastí Jeseníků. Na rozloze 368 km² žilo k 31.12.2013 celkem 16 180 obyvatel, hustota tedy činí průměrně cca 45 obyvatel na km². Až třetina území mikroregionu Rýmařovsko leží v Chráněné krajinné oblasti Jeseníky. Významná část mikroregionu je rovněž pokryta zalesněnými plochami (cca 50% území). Charakter krajiny zajišťuje pro danou zeměpisnou polohu dobré podmínky pro rekreaci celoročního charakteru, čímž se vytváří významný potenciál cestovního ruchu, což posiluje především ekonomickou výkonnost mikroregionu.



Obr. 3.1 Mapa správního uspořádání ČR k 31.1.2015 [10]



Obr. 3.2 Mapa mikroregionu s vyznačením rozhodující silniční sítě [8]

Přírozeným centrem mikroregionu je město Rýmařov, ve kterém ke dni 1.1.2015 žilo 8 659 obyvatel. Jsou zde soustředěny všechny instituce rozhodující z hlediska každodenního života obyvatelstva (nemocnice, městský úřad s rozšířenou působností, školská zařízení apod.) jde tedy o spádové centrum jak v oblasti zaměstnanosti, vzdělání, státní správy, zdravotnictví atd.

V rámci města Rýmařov, které není svou rozlohou rozsáhlé, a nejbližšího okolí není zavedena městská hromadná doprava. Cestující proto v tomto regionu využívají především veřejné autobusové a železniční dopravy.

3.1 Infrastruktura veřejné hromadné dopravy v mikroregionu

Na Rýmařovsku se nachází regionální železniční trať vedoucí z Valšova přes obce Brdličná a Velká Štáhle do Rýmařova. Délka tratě je 15 km dlouhá. Jedná se o jednokolejnou neelektrifikovanou trať. Regionální trať Valšov – Rýmařov je ve stanici Valšov zaústěna do tratě celostátního významu Olomouc – Krnov. Řízení drážní dopravy probíhá ve zjednodušeném režimu podle ustanovení předpisu D3.

Základní komunikační kostru Rýmařovska tvoří úsek silnice I. třídy a poměrně hustá síť silnic II. a III. třídy. Zbývající část silniční sítě je tvořena komunikacemi nižších tříd a místními účelovými komunikacemi. Hustota silniční sítě a kvalita silnic nižších tříd je nízká, což je dáno charakterem horské a podhorské krajiny, ve které se Rýmařovsko nachází. Z tohoto důvodu také odlehlejší oblasti mikroregionu vykazují poměrně nízkou úroveň dopravní obslužnosti. V regionu se nenachází žádná z komunikací dálničního typu; kostrou silniční sítě je tedy silnice I. třídy v majetku státu (zastoupený ŘSD) spolu se silnicemi II. třídy (v majetku kraje):

- I/11 (Hr. Králové – Šumperk –) Stará Ves – Rýmařov – Malá Štáhle (– Bruntál – Opava – Ostrava – Třinec – státní hranice ČR/Slovensko)
- II/370 (Libina –) Tvrdkov – Rýmařov – Břidličná (– Valšov)
- II/440 II/445 - Ryžoviště (– Moravský Beroun – Libavá)
- II/445 (Šternberk – Huzová –) Břidličná – Stránské – Rýmařov – Malá Morávka (– Zlaté Hory – státní hranice ČR/Polsko)
- II/449 Rýmařov (Uničov – Litovel – Prostějov)

Ve vhodných místech, kde dochází ke styku železniční sítě se sítí pozemních komunikací umožňujících provoz autobusové dopravy, bývá zvykem budovat přestupní terminály různé velikosti a různého významu. Tyto terminály nejenže usnadňují přestupy cestujících, ale také mají za cíl zlepšit podmínky pro čekání cestujících v situacích, kdy se nepodaří zorganizovat dopravu tak, aby spoje na sebe bezprostředně nebo v blízkém odstupu navazovaly. V mikroregionu Rýmařovska se nenachází ani jeden podobný terminál. Příčinou tohoto stavu je, že vhodných míst k uvedeným přestupům je nízký počet a dále fakt, že intenzita přestupujících cestujících není tak vysoká, aby uzly podobného významu vznikaly.

3.2 Charakteristika stávajícího rozsahu veřejné dopravy

Moravskoslezský kraj má zřízený integrovaný dopravní systém veřejné dopravy (ODIS), který byl rozšířen na Rýmařovsko ve dvou postupných krocích. Nejprve byla do systému integrována pouze železniční trať Valšov – Rýmařov a až následně v červnu 2012 proběhla integrace i u autobusových linek. Na území Rýmařovska provozuje veřejnou osobní železniční dopravu společnost České dráhy, a.s. a veřejnou osobní autobusovou dopravu společnost ARRIVA MORAVA a.s.

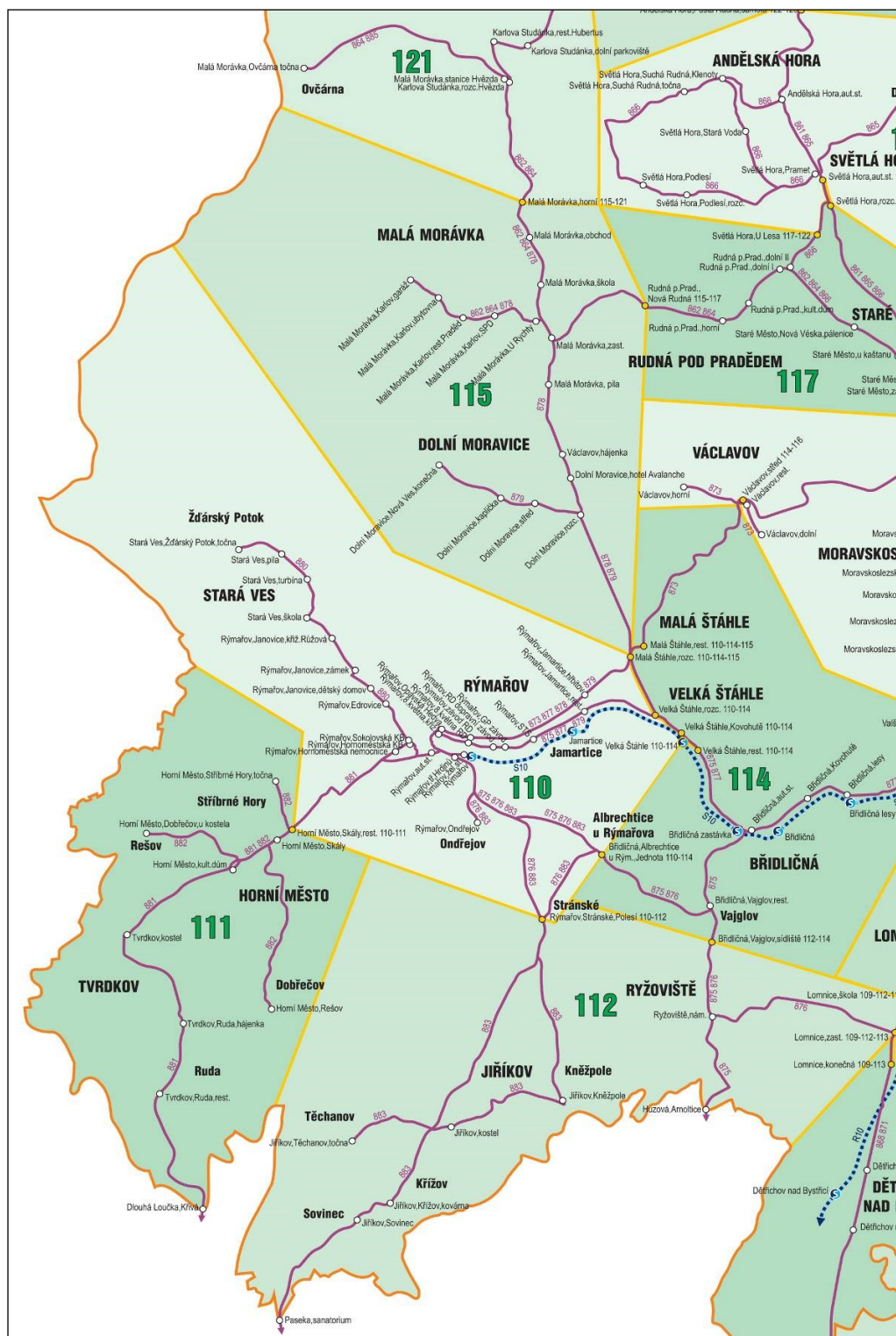
Mapa části ODIS zasahující na území mikroregionu Rýmařovsko je uvedena na obr. č. 3.2.

V rámci dopravní obslužnosti mikroregionu zajišťované veřejnou hromadnou dopravou jednoznačně převládá veřejná autobusová doprava. Železniční doprava se omezuje pouze na 9 párů vlaků jezdících v pracovní dny, 8 párů vlaků vypravovaných v sobotu a 7 párů vlaků vypravovaných v neděli. Údaje o počtech párů vlaků jsou vztaženy k jízdnímu řádu 2014/15.

Území mikroregionu je obsluhováno celkem 11 autobusovými linkami. Počty spojů na jednotlivých linkách mají značnou variabilitu. Některé linky nejsou obsluhovány v celé své délce, spoje na těchto trasách jsou často provozovány pouze v dílčích úsecích linek. Detailnější popis autobusových linek a na nich provozovaných spojů lze dohledat na internetových stránkách <http://jizdnirady.idnes.cz/autobusy/spoje/>. Počty spojů lze vyčíst z tabulky č. 3.1.

Tab. č. 3.1 Počty autobusových spojů na linkách obsluhujících mikroregion

Číslo linky	Počty spojů dané linky v pracovních dnech	Počty spojů dané linky v sobotu	Počty spojů dané linky v neděli
850873	25	1	0
850875	15	4	2
850876	10	0	0
850877	56	7	10
850878	10	0	0
850879	4	0	0
850880	22	8	8
850881	32	6	6
850883	8	4	2
890711	23	6	7
890726	0	4	4



Obr. 3.2 Zóny Integrovaného dopravního systému Moravskoslezského kraje [8]

Z hlediska hustoty spojů a celkové dostupnosti veřejnou autobusovou dopravou jsou výrazně lépe obslouženy obce ležící podél železniční trati 311 (tj. Břidličná, Velká Štáhle), na silnici I/11 (Stará Ves, Malá Štáhle) a na silnici II/440 (Břidličná, Ryzoviště),

po které jezdí také spoje dálkových autobusových linek. V ostatních obcích je dopravní obslužnost horší.

4 TEORETICKÁ VÝCHODISKA ŘEŠENÍ

4.1 Stručná analýza současného stavu poznání v oblasti optimalizačních metod

Je-li řešená úloha plánovací úlohou a je-li k dispozici dostatečně výkonný hardware a software, je k optimalizaci vhodné použít metod lineárního programování. Lineární programování je soubor metod, které umožňují výběr optimální varianty při daném optimalizačním kritériu a daných omezujících podmínkách. Předmětem kapitoly 4 bude popis nástrojů a metod, které slouží k optimalizaci problémů a úloh z oblasti veřejné hromadné dopravy.

V současné době se k modelům, které přicházejí v úvahu pro řešení definovaného problému, řadí:

- modely pro časovou koordinaci spojů,
- modely pro plánování oběhů vozidel,
- modely pro návrh sítě linek.

V odborné literatuře jsou zmíněny případové studie, kdy jednotlivé modely byly aplikovány izolovaně, což ovšem nemusí vést k nalezení globálního optima (nejefektivnějšího způsobu zabezpečení dopravní obslužnosti). Je proto žádoucí zabývat se způsobem jejich vzájemného propojení tak, aby se celý proces návrhu dopravní obslužnosti co nejvíce zefektivnil. Takovéto přístupy do budoucna budou moci nahradit konstruktéry jízdních řádů v oblasti hledání optimálního řešení dopravní obslužnosti.

Předmětem řešení diplomové práce bude v závislosti na charakteristice provedené v kapitole 3 hledání způsobu vhodného propojení modelů pro časovou koordinaci spojů a modelů pro plánování oběhů vozidel. Modely pro návrhy sítě linek budou popsány pouze okrajově, neboť pro řešení definovaného problému nejsou až tak významné. Jejich využití totiž přichází v úvahu zejména v podmínkách městské hromadné dopravy větších měst, což neodpovídá vstupní charakteristice řešeného problému.

Nejdříve však budou shrnuta základní pravidla, na základě kterých je možno vytvářet lineární matematické modely.

4.2 Pravidla pro tvorbu lineárních modelů

Předmětem optimalizace je vyhledání nejlepšího řešení z množiny tzv. přípustných řešení. Aby mohla být porovnávána kvalita jednotlivých řešení, musí být nedílnou

součástí modelu účelová funkce neboli optimalizační kritérium. Např. je-li požadováno minimalizovat náklady, musí být účelová funkce tvořena vztahem, na základě kterého lze náklady vypočítat. Účelová funkce v sobě musí zahrnovat všechny varianty výpočtu hodnoty optimalizované veličiny, které se mohou při řešení vyskytnout. Pokud některá varianta v účelové funkci chybí, algoritmus při optimalizaci k těmto nezařazeným variantám nepřihlíží. Navíc je důležité stanovit vhodný typ hledaného extrému (minimum/maximum) optimalizačního kritéria.

Struktura lineárního matematického modelu je pro řešitele závazná, každý lineární model musí kromě optimalizačního kritéria obsahovat tzv. soustavu omezujících podmínek. Omezující podmínky jsou dvojího typu – strukturální a obligatorní. Strukturální podmínky vymezují reálná omezení nebo vytvářejí logické vazby mezi proměnnými. Obligatorní podmínky vymezují definiční obory proměnných.

V úlohách lineárního programování rozlišujeme data, která jsou k dispozici na vstupu – konstanty a data, jejich konkrétní hodnoty nejsou před začátkem řešení úlohy známy a během výpočtu se mění – proměnné.

Každá proměnná musí mít určen svůj definiční obor. Volba definičního oboru závisí na typu rozhodnutí, které daná proměnná modeluje. V lineárním programování se u proměnných používají 3 typy definičních oborů:

- množina nezáporných čísel,
- množina celých nezáporných čísel,
- množina hodnot $\{0,1\}$.

Např. modeluje-li proměnná počet nasazených autobusů, využije se definičního oboru – množiny nezáporných celých čísel. Modeluje-li proměnná rozhodnutí o tom, zda daný spoj provozovat nebo neprovozovat, jedná se o rozhodnutí ANO/NE a volí se proměnná, která nabývá hodnot 0 a 1. Této množině hodnot se říká bivalentní proměnná, kdy pozitivní rozhodnutí je zpravidla modelováno hodnotou 1 a negativní rozhodnutí hodnotou 0. Je-li možné v případě některého rozhodnutí užít jako definiční obor množinu nezáporných čísel, tak se tato volba preferuje, protože s proměnnými s tímto definičním oborem optimalizační softwary rychleji pracují a mohou zvládat při stejné paměťové náročnosti i rozsáhlejší úlohy.

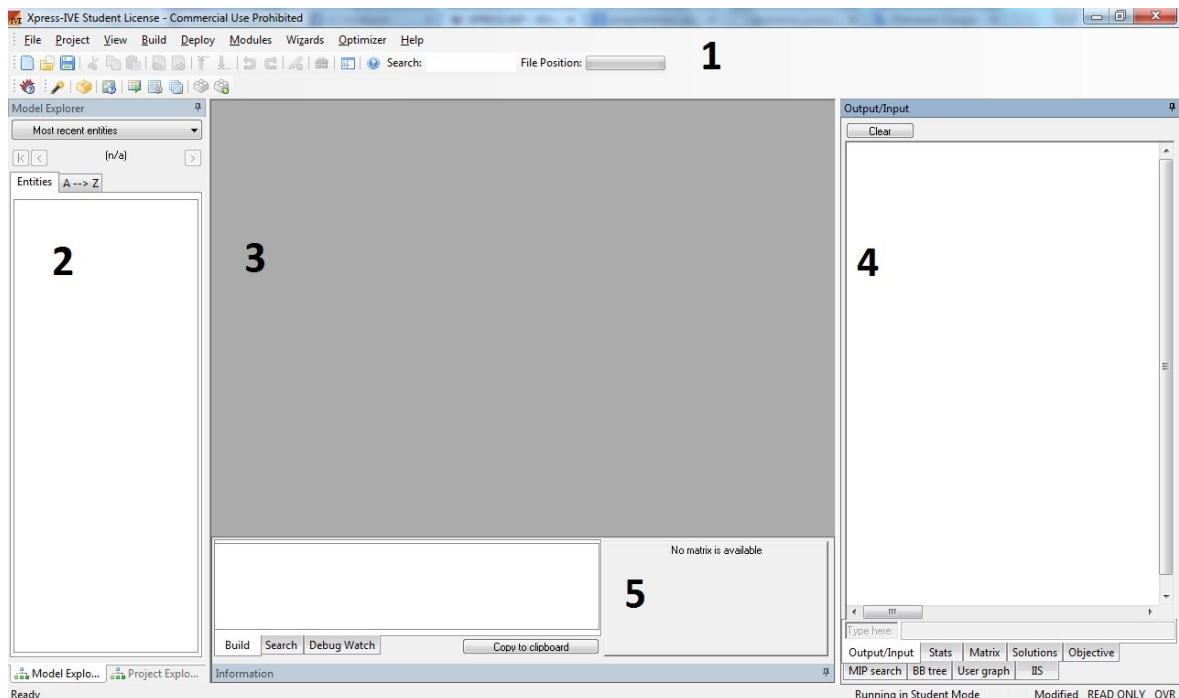
Při konstrukci matematického modelu z lineárního programování je možné používat pouze některé početní operace s proměnnými a některá relační znaménka. Z hlediska

relačních znamének je v lineárním programování dovoleno používat pouze znaménka \leq , \geq , $=$. Výrazy obsahující proměnné je dovoleno sčítat, odčítat a násobit reálnou konstantou. Porušením pravidel z dvou předchozích vět se poruší linearita modelu.

Následující podkapitola bude věnována problematice řešení lineárních modelů v optimalizačním software Xpress-IVE.

4.3 Základní popis software Xpress-IVE

Možností jak řešit optimalizační úlohy je několik, v dnešní době se preferují spíše použití optimalizačních software před ručním řešením. Vhodných software existuje celá řada, pro potřeby diplomové práce je použit produkt Xpress-IVE od společnosti FICO, jehož použití je pro uživatele jednoduché a rychlé. Do systému jsou při řešení lineárních matematických modelů zadávány koeficienty ve standardizované formě a řešení úlohy poskytuje výstup ve tvaru optimálních hodnot proměnných a optimalizované hodnoty účelové funkce. Programovacím jazykem softwaru je MOSEL. Pracovní plocha programu Xpress-IVE je znázorněna na obrázku č. 4.1.



Obr. 4.1 Struktura software Xpress-IVE

Pracovní plochu lze rozdělit na 5 základních částí. V části označené číslem 1 jsou lišty nástrojů. Pro běžné výpočetní experimenty jsou využívány dva základní nástroje a to *Compile* a *Run model*.

Funkce *Compile* provádí ověření syntaktické správnosti textu programu zapsané v části 3. Pokud je v textu nalezena syntaktická nesrovnalost, je tato chyba zvýrazněna žlutým podbarvením a zároveň je na pracovní ploše v části 5 uvedeno adekvátní chybové hlášení a bližší specifikace pozice problému v textu programu. Neobsahuje-li text programu žádnou syntaktickou chybu, potvrdí se tento fakt opět v části 5. Funkce *Run model* slouží k zahájení výpočtů.

Druhou část pracovní plochy tvoří okno, ve kterém jsou zapisovány všechny veličiny použité v modelu. Vlastní text programu se zapisuje v jazyku MOSEL do části 3. Dosažené výsledky daného modelu se zapisují do části 4. Je možné si nechat řešení vypsát například graficky a to je umožněno v podoknech části 4.

4.3.1 Zásady transformace matematického modelu do jazyku MOSEL

Pro zpracování optimalizačního výpočtu je nutné matematický model převést do textu programu v programovacím jazyce MOSEL. Způsob zápisu modelu má unifikovanou strukturu, navíc software Xpress-IVE rozlišuje malá a velká písmena. Při zápisu modelu v nástroji Xpress-IVE musí být dodrženy následující kroky:

- deklarace indexů, konstant typu pole a rozhodovacích proměnných,
- uvedení konkrétních hodnot koeficientů modelu,
- zápis strukturálních podmínek,
- zápis účelové funkce včetně jejího označení,
- uvedení příkazu optimalizace,
- uvedení požadavku na výpisy výsledků optimalizačního výpočtu.

V prvním kroku je nejdříve vytvořen název modelu. Deklarační část matematického modelu začíná klíčovým slovem *declarations* a končí klíčovým slovem *end – declarations*. Do deklarační části jsou vloženy všechny konstanty typu pole a všechny proměnné.

Necht' je uvažováno se 17 spojů v 8 směrech. Množina spojů vstupujících do optimalizační úlohy se do software zapíše například následujícím způsobem:

smer1=1..2

smer2=3..4

smer3=5..5

smer4=6..8

smer5=9..10

smer6=11..12

smer7=13..15

smer8=16..17

V deklarační části textu programu se používají se následující typy zápisů:

- *integer* – označení celočíselné nezáporné konstanty,
- *real* – označení reálné konstanty,
- *mpvar* – označení proměnné.

Možná ukázka deklarace konstant:

toda:array(spojaut)of real

Proměnnou deklarujeme například následovně:

h1:array(smer1)of mpvar

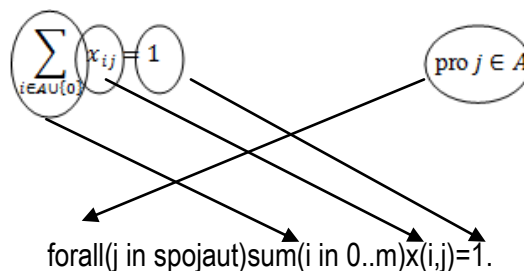
Po ukončení deklarační části zavedeme hodnoty jednotlivých konstant. Konkrétní hodnoty konstanty typu pole se do software zapisuje například způsobem:

toda:=[10,130,83,247,172,0,110,230,35,200,110,265]

Konstanta, která není typu pole, se do software zapisuje například způsobem:

tba:=25

V software následuje část s vypsáním omezujících podmínek. V matematickém modelu se vyskytuje skupina omezujících podmínek, která se v textu zapisuje například následovně:



Příkaz, který zajišťuje, aby proměnné nabývaly hodnot 0 a 1 se zapíše například způsobem:

```
forall(i in smer1,j in smer5)z15(i,j)is_binary
```

Text programu je možno doplňovat různými komentáři, textu komentáře je však nutno předřadit znak „!“. Komentář nijak neovlivňuje funkčnost modelu.

Software Xpress-IVE umožňuje uživatelům, aby si výpisy výsledků optimalizačního výpočtu upravili podle vlastních požadavků. Standartním výstupem, který software nabízí, je výstup v okně přímo v nástroji ve formě textu. Pro zjištění vypočítané hodnoty účelové funkce musí být v požadavku na výpisy zadán příkaz *getobjval*. Pro zjištění konkrétních hodnot rozhodovacích proměnných nebo veličin, které jsou jimi ovlivněny, musí být v požadavku na výpisy obsažen příkaz *getsol* (), přičemž v závorce bude uvedeno označení zvolené rozhodovací proměnné nebo výrazu, jehož hodnota má být vypsána. Výše uvedená klíčová slova musí být v textu programu uvedena v předepsané kombinaci s příkazem *writeln* (), který může být dále kombinován dále s příkazem cyklu *forall*, je-li požadován výpis více výsledků pocházejících ze stejné skupiny. Software také umožňuje celou řadu dalších výstupů a statistik v grafické formě včetně informací o průběhu optimalizačního výpočtu. [3]

Výpis hodnoty počtu nasazených autobusových vozidel na obsluhu daných autobusových spojů v případě řešené úlohy bude mít například tvar:

```
writeln(getsol(sum(j in spojaut)M*x(0,j)))
```

V následujících podkapitolách bude detailnější pozornost věnována modelům pro časovou koordinaci spojů a plánování oběhů vozidel.

4.4 Časová koordinace spojů v uzlech dopravní sítě

Prvotní výzkumy a úvahy související s časovou koordinací vznikaly přibližně před 30 lety na Oddělení kvantitativních metod Výzkumného ústavu v Žilině. Prof. RNDr. Jan Černý, DrSc., Dr. h. c. a jeho spolupracovníci se tehdy zabývali systematickým výzkumem a vývojem optimalizačních metod pro potřeby dopravní praxe. Jejich výsledky byly v pozdější době využity jako základ nově se rodící vědní disciplíny – matematické teorie dopravy. Mezi řešené úlohy byly také koordinační úlohy, resp. úlohy o koordinaci spojů veřejné osobní dopravy.

V současné době existují 3 základní typy časové koordinace spojů. Koordinaci je možno provádět v uzlech dopravních sítí, na úsecích dopravních sítí a nejdokonalejší, ovšem také z hlediska řešení nejkomplicovanější, je koordinace síťová. Charakteristickým znakem v úlohách o koordinaci jsou posuny spojů, které danou dopravní síť obsluhují.

4.4.1 Původní model časové koordinace

Poměrně jednoduchý a přitom velice výkonný lineární model pro řešení časové koordinace zformuloval v roce 2007 prof. RNDr. Jaroslav Janáček, CSc. z Fakulty riadenia a informatiky Žilinskej univerzity v Žilině. Model byl sice navržen ve tvaru pro časovou koordinaci spojů příjíždějících z jednoho směru a odjíždějících do jednoho směru v izolovaném přestupním uzlu, je však vytvořen v takovém tvaru umožňujícím snadné modifikace i pro obecnější případy (příjezdy z více směrů, odjezdy do více směrů atd.). Následuje formulace původního problému.

Je dána množina příjíždějících spojů I a množina odjíždějících přípojných spojů J . Pro každý příjíždějící spoj $i \in I$ je znám pravidelný čas jeho příjezdu do přestupního uzlu, pro každý odjíždějící spoj $j \in J$ je znám pravidelný čas jeho odjezdu z přestupního uzlu. Pro každý příjíždějící spoj $i \in I$ a odjíždějící spoj $j \in J$ jsou definovány nezáporné intervaly, ve kterých je dovoleno s těmito spoji manipulovat v čase. Pro každý příjíždějící spoj $i \in I$ je známa intenzita cestujících, kteří budou v přestupním uzlu přestupovat a dále je k dispozici informace o přestupní době mezi stanovišti příjíždějících a odjíždějících spojů. Úkolem je rozhodnout o posunech jednotlivých příjíždějících a odjíždějících spojů v přípustných časových intervalech tak, aby se minimalizovala celková časová ztráta všech přestupujících cestujících.

V dalším textu budou vstupní údaje (mající povahu konstant) označeny následovně:

tp_i ...čas nejdříve možného příjezdu spoje $i \in I$ do přestupního uzlu,
 to_j ...čas nejdříve možného odjezdu spoje $j \in J$ z přestupního uzlu,
 f_i ...intenzita cestujících, kteří budou v přestupním uzlu ze spoje $i \in I$ přestupovat,
 a_i ...maximální dovolený časový posun příjíždějícího spoje $i \in I$,
 b_j ...maximální dovolený časový posun odjíždějícího spoje $j \in J$,
 t_{prest} ...přestupní doba.

Za účelem rozhodnutí realizovaných v modelu jsou zavedeny následující rozhodovací proměnné:

x_i ...časový posun příjíždějícího spoje $i \in I$ (počítáno od času nejdříve možného příjezdu),
 y_j ...časový posun odjíždějícího spoje $j \in J$ (počítáno od času nejdříve možného odjezdu),
 h_i ...čekání cestujícího, který do přestupního uzlu přijel spojem $i \in I$, na navazující spoj,
 z_{ij} ...proměnná modelující vznik přestupní vazby mezi příjíždějícím spojem $i \in I$ a odjíždějícím spojem $j \in J$.

Definičními obory proměnných s výjimkou proměnné z_{ij} budou množiny nezáporných čísel. Proměnná z_{ij} bude bivalentní. Matematický model úlohy o časové koordinaci spojů v izolovaném uzlu má tvar.

$$\min f(x, y, h, z) = \sum_{i \in I} f_i h_i \quad (4.2.1)$$

$$to_j + y_j - (tp_i + x_i) - t_{prest} \geq T(z_{ij} - 1) \quad \text{pro } i \in I \text{ a } j \in J \quad (4.2.2)$$

$$to_j + y_j - (tp_i + x_i) - t_{prest} \leq h_i + T(1 - z_{ij}) \quad \text{pro } i \in I \text{ a } j \in J \quad (4.2.3)$$

$$\sum_{j \in J} z_{ij} = 1 \quad \text{pro } i \in I \quad (4.2.4)$$

$$x_i \leq a_i \quad \text{pro } i \in I \quad (4.2.5)$$

$$y_j \leq b_j \quad \text{pro } j \in J \quad (4.2.6)$$

$$x_i \geq 0 \quad \text{pro } i \in I \quad (4.2.7)$$

$$y_j \geq 0 \quad \text{pro } j \in J \quad (4.2.8)$$

$$h_i \geq 0 \quad \text{pro } i \in I \quad (4.2.9)$$

$$z_{ij} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } i \in I \text{ a } j \in J \quad (4.2.10)$$

Výraz (4.2.1) reprezentuje účelovou funkci – celkovou časovou ztrátu všech přestupujících cestujících. Skupiny omezujících podmínek (4.2.2) a (4.2.3) jsou tzv. podmínky typu „bud’ anebo“. Skupina omezujících podmínek (4.2.2) zajistí, že nastane-li okamžik příchodu cestujících na stanoviště odjíždějícího spoje po odjezdu tohoto spoje, přestupní vazba nevzniká (je-li přestup časově přípustný, není daná podmínka aktivní). Skupina omezujících podmínek (4.2.3) zajistí vazbu soustavy omezujících podmínek na účelovou funkci modelu. Skupina podmínek (4.2.4) zajistí, že z každého příjíždějícího spoje bude vytvořena přestupní vazba na právě jeden odjíždějící spoj. Skupiny omezujících podmínek (4.2.5) a (4.2.6) zajistí, že při posunech spojů nebudou překročeny meze intervalů přípustných pro tyto posuny. Skupiny omezujících podmínek (4.2.7) – (4.2.10) reprezentují definiční obory proměnných. [6]

4.5 Optimalizace oběhů vozidel

Oběhem vozidla se rozumí posloupnost spojů, které jsou tímto vozidlem obslouženy. Základní kroky v řešení uvedeného typu úloh na bázi optimalizačních metod byly provedeny v 80. letech 20. století opět ve Výzkumném ústavu dopravním v Žilině a opět týmem prof. RNDr. Jana Černého, DrSc., Dr.h.c., kdy byl vytvořen software s názvem KASTOR (Komunikativní Automatizovaný Systém Oběhových Rozvrhů), který byl velice úspěšně v minulosti také použit [6]. Jak už bylo definováno v předchozích kapitolách, oběhy vozidel mají zásadní ekonomický význam na provozování veřejné hromadné dopravy.

Z hlediska klasifikace úloh o obězích vozidel [6] je žádoucí rozlišovat situace, kdy:

- počet spojů je na lince značný (typicky městská hromadná doprava),
- opak - počet spojů na linkách není značný (typicky příměstská doprava).

a dále zda se oběhy vytvářejí v podmínkách:

- homogenního vozidlového parku
- heterogenní vozidlový park.

Většina modelů, na základě kterých se oběhy vozidel optimalizují, má zpravidla společné optimalizační kritérium a to je celkový počet použitých vozidel, který je požadováno minimalizovat. V některých modelech je součástí optimalizační úlohy vytvořeno i přidružené kritérium – celková neproduktivně ujetá vzdálenost.

V následující podkapitole budou uvedeny základní typy modelů, na základě kterých se dají oběhy vozidel optimalizovat a budou základem pro návrh modelu pro potřeby diplomové práce.

4.5.1 Model oběhů vozidel v podmínkách homogenního vozidlového parku bez možnosti časových posunů spojů

Je definována množina spojů I , které je nutno obsloužit (předpokládá se, že $|I| = n$). Pro každý spoj $i \in I$ je definován čas odjezdu z výchozí konečné zastávky a doba obsluhy spoje (doba jízdy z výchozí konečné zastávky do cílové konečné zastávky). Dále je k dispozici matice dob potřebných k přejezdům vozidel mezi cílovými konečnými zastávkami s výchozími konečnými zastávkami jednotlivých spojů. Úkolem je rozhodnout o posloupnostech spojů, které mají být obslouženy stejnými vozidly tak, aby každý spoj z množiny I byl obsloužen a celkový počet nasazených vozidel byl minimální.

V dalším textu tedy vstupní údaje (mající povahu konstant) budou označeny následovně:

t_i ...čas odjezdu spoje $i \in I$ z výchozí konečné zastávky,

t_j ...čas odjezdu spoje $j \in J$ z výchozí konečné zastávky,

T_i ...doba jízdy z výchozí konečné zastávky do cílové konečné zastávky,

r_{ij} ...doba přejezdu mezi cílovou konečnou zastávkou spoje $i \in I$ a výchozí konečnou zastávkou spoje $j \in J$.

Aby bylo možno vytvořit posloupnosti spojů ve smyslu požadavku uvedeného v zadání, je třeba, aby proměnné modelovaly rozhodnutí o přesunech vozidel mezi spoji. Za tím účelem se do úlohy zavede skupina bivalentních proměnných x_{ij} , pro $i \in I$ a $j \in I$, modelujících rozhodnutí, zda se vozidlo obsluhující spoj $i \in I$ přesune k obsluze spoje $j \in I$ ($x_{ij} = 1$) či nikoliv ($x_{ij} = 0$).

Pro úspěšné řešení úlohy není třeba, aby proměnné obsahovaly indexy jednotlivých vozidel vozidla, neboť z plánu přesunů jsou snadno identifikovatelné i plány jízd konkrétních nasazených vozidel.

Nad rámec zadání budou pro potřeby modelování zavedeny dva pomocné indexy 0 a $n + 1$. Tyto spoje budou modelovat tzv. výchozí a koncové depo, ze kterých budou vozidla k obsluze pomyslně vyjíždět, a do kterých se budou pomyslně vracet. Zavedení uvedených pomocných indexů není výsledkem předložené práce, podobného přístupu bylo využívání i v minulosti některými z výše uvedených autorů.

Matematický model pro řešení úlohy bude mít tvar:

$$\min f(x) = \sum_{i \in I} x_{0i} \quad (4.3.1)$$

za podmínek

$$\sum_{i \in I \cup \{0\}; i \neq j} x_{ij} = 1 \quad \text{pro } j \in I \quad (4.3.2)$$

$$\sum_{j \in I \cup \{n+1\}; j \neq i} x_{ij} = 1 \quad \text{pro } i \in I \quad (4.3.3)$$

$$t_i + T_i + r_{ij} \leq t_j + M(1 - x_{ij}) \quad \text{pro } i \in I, j \in I \text{ a } i \neq j \quad (4.3.4)$$

$$x_{ij} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } i \in I \cup \{0\}, j \in I \cup \{n+1\} \text{ a } i \neq j \quad (4.3.5)$$

Funkce (4.3.1) reprezentuje optimalizační kritérium – počet vozidel nasazených k obsluze množiny spojů I . Skupina omezujících podmínek (4.3.2) zajistí, že k obsluze každého spoje $j \in I$ přijede vozidlo buď z výchozího depa, nebo po obsluze jiného spoje. Skupina omezujících podmínek (4.3.3) zajistí, že po obsluze každého spoje $i \in I$ odjede vozidlo buď k obsluze dalšího spoje, nebo do koncového depa. Skupina omezujících podmínek (4.3.4) zajistí, že nedojde k časově nepřipustným přejezdům. Skupina omezujících podmínek (4.3.5) formuluje definiční obory proměnných x_{ij} .

4.5.2 Model oběhů vozidel v podmínkách homogenního vozidlového parku s možností časových posunů spojů

Formulace zadání pro druhou variantu je stejná jako v případě první varianty s tím rozdílem, že nad rámec zadání pro první variantu je možno se spoji posouvat v čase.

Abychom omezili počet použitých symbolů na minimum, bude symbol t_i nově znamenat nejdříve možný čas odjezdu spoje $i \in I$ a dále pro každý spoj $i \in I$ bude definován maximální dovolený posun odjezdu spoje a_i z výchozí konečné zastávky. Analogicky jako v případě časové koordinace spojů se může vyskytnout varianta, kdy se spojem nebude možno posouvat v čase. V takovém případě bude pro hodnotu konstanty a_i platit $a_i = 0$.

Pokud platí $a_i = 0$ pro každý spoj $i \in I$, přechází varianta II do varianty I.

Matematický model varianty II má tvar:

$$\min f(x, z) = \sum_{i \in I} x_{0i} \quad (4.4.1)$$

za podmínek

$$\sum_{i \in I \cup \{0\}; i \neq j} x_{ij} = 1 \quad \text{pro } j \in I \quad (4.4.2)$$

$$\sum_{j \in I \cup \{n+1\}; j \neq i} x_{ij} = 1 \quad \text{pro } i \in I \quad (4.4.3)$$

$$t_i + z_i + T_i + r_{ij} \leq t_j + z_j + M(1 - x_{ij}) \quad \text{pro } i \in I, j \in I \text{ a } i \neq j \quad (4.4.4)$$

$$z_i \leq a_i \quad \text{pro } i \in I \quad (4.4.5)$$

$$x_{ij} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } i \in I \cup \{0\}, j \in I \cup \{n+1\} \text{ a } i \neq j \quad (4.4.6)$$

$$z_i \geq 0 \quad \text{pro } i \in I \quad (4.4.7)$$

Interpretace funkce (4.4.1) a význam skupin omezujících podmínek (4.4.2) – (4.4.4) a (4.4.6) jsou totožné s interpretací a významem v případě varianty I modelu. Skupina omezujících podmínek (4.4.5) zajistí, že potenciální posuny spojů se uskuteční v přípustných mezích. Skupina omezujících podmínek (4.4.7) formuluje definiční obory proměnných z_i .

5 NÁVRH MATEMATICKÉHO MODELU

Kapitola 5 je věnována obecnému řešení úlohy o současné časové koordinaci spojů v přestupních uzlech (bude uvažována varianta s více přestupními uzly) a optimalizaci oběhů vozidel. Nejdříve tedy bude uvedena formulace úlohy a následně navržený matematický model vhodný k jejímu řešení.

Je dána množina přestupních uzlů K . Pro každý přestupní uzel $k \in K$ je dána množina vlakových spojů V_k odjíždějících z daného uzlu. Dále je dána množina autobusových spojů A . V rámci této množiny jsou definovány podmnožiny spojů A_k , které je nutno koordinovat s vlakovými spoji v uzlu $k \in K$ a podmnožina spojů A_0 , jejichž koordinaci s vlakovými spoji není možno provádět, protože uzly, ve kterých je koordinace možná, neprojíždějí. Předpokládá se situace, že každý spoj $i \in A$ bude koordinován v maximálně jednom uzlu.

Pro každý autobusový spoj $i \in A$ je známa doba spoje T_i , nejdříve možný čas odjezdu z výchozí zastávky tod_i a maximální dovolený časový posun tohoto odjezdu au_i . Pro každý odjíždějící vlakový spoj $v \in V$ v uzlu $k \in K$ je znám nejdříve možný čas jeho odjezdu z uzlu $k \in K$ - tod_{vk} a maximální dovolený časový posun tohoto odjezdu au_{vk} . Pro každý přestupní uzel $k \in K$ je definována minimální přestupní doba mezi okamžikem příjezdu autobusového spoje a odjezdem vlakového spoje t_{pres_k} .

Pro každý autobusový spoj $i \in A_k$, kde $k \in K$, je definována intenzita přestupujících cestujících f_i . Pro každou dvojici autobusových spojů $i, j \in A$ je definována neproduktivně ujetá vzdálenost mezi cílovou zastávkou spoje $i \in A$ a výchozí zastávkou spoje $j \in A$ označená d_{ij} a doba potřebná k překonání této vzdálenosti r_{ij} . Úkolem je rozhodnout o časových polohách autobusových spojů tak, aby k obsluze množiny autobusových spojů A bylo zapotřebí co nejméně vozidel, při přejezdech vozidel mezi spoji byla ujeta minimální neproduktivní vzdálenost a aby v přestupních uzlech bylo minimalizováno čekání cestujících přestupujících z autobusových spojů na vlakové spoje.

Rekapitulace označení množin vstupních dat:

K ...množina přestupních uzlů,

V_k ...množina vlakových spojů odjíždějících z uzlu $k \in K$,

A ... množina autobusových spojů,

A_k ... podmnožina autobusových spojů, které je nutno koordinovat s vlakovými spoji v uzlu $k \in K$,

A_0 ... podmnožina autobusových spojů, jejichž koordinaci s vlakovými spoji není možno provádět, protože uzly, ve kterých je koordinace možná, neprojíždějí.

Rekapitulace označení veličin majících povahu konstant:

t_{presk} ... minimální přestupní doba v uzlu $k \in K$,

T_i ... doba spoje pro autobusový spoj $i \in A$,

tod_i ... čas nejdříve možného odjezdu autobusového spoje $i \in A$ z výchozí konečné zastávky,

tod_{vk} ... čas nejdříve možného odjezdu spoje $v \in V$ z přestupního uzlu $k \in K$,

au_i ... maximální dovolený časový posun autobusového spoje $i \in A$,

au_{vk} ... maximální dovolený časový posun spoje $v \in V$ v uzlu $k \in K$,

f_i ... intenzita cestujících, kteří budou v přestupním uzlu přestupovat ze spoje $i \in A$,

d_{ij} ... neproduktivně ujetá vzdálenost mezi cílovou zastávkou autobusového spoje $i \in A$ a cílovou zastávkou autobusového spoje $j \in A$,

r_{ij} ... doba potřebná k projetí vzdálenosti d_{ij} (viz výše),

M ... prohibitivní konstanta.

Za účelem rozhodnutí realizovaných v modelu zavedeme následující proměnné:

w_i ... časový posun příjíždějícího spoje $i \in A$,

w_{vk} ... časový posun odjíždějícího spoje $v \in V$ v přestupním uzlu $k \in K$,

h_i ... čekání cestujícího, který přestupuje ze spoje $i \in A$,

z_{iv} ... proměnná modelující vznik přestupní vazby mezi příjíždějícím spojem $i \in A$ a odjíždějícím spojem $v \in V$,

x_{ij} ... proměnná modelující přejezd vozidla po obsluze spoje $i \in A$ k obsluze spoje $j \in A$.

Pro potřeby plánování oběhů autobusů je zapotřebí zavést ještě jednu speciální skupinu proměnných s označením x_{0j} . Tyto proměnné budou modelovat rozhodnutí o nasazení vozidla k obsluze spoje $j \in A$.

Definiční obory proměnných s výjimkou z_{iv} budou množiny nezáporných čísel, proměnná z_{iv} bude bivalentní.

Po zavedení konstant a proměnných můžeme přistoupit k matematickému modelu. Ten bude mít tvar:

$$\min f(x, w, h, z) = \sum_{i \in A} f_i h_i + \sum_{i \in A} M x_{0j} + \sum_{i \in AU\{0\}} \sum_{j \in A} d_{ij} x_{ij} \quad (5.1)$$

za podmínek

$$\begin{aligned} tod_{vk} + w_{vk} - (tod_i + w_i + T_i + t_{pres_k}) \\ \geq M(z_{iv} - 1) \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{pro } i \in A, \quad k \in K \\ \text{a } v \in V \end{array} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} tod_{vk} + w_{vk} - (tod_i + w_i + T_i + t_{pres_k}) \\ \leq h_i + M(1 - z_{iv}) \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{pro } i \in A, \quad k \in K \\ \text{a } v \in V \end{array} \quad (5.3)$$

$$tod_i + w_i + T_i + r_{ij} \leq tod_{vk} + w_{vk} + M(1 - x_{ij}) \quad \text{pro } i, j \in A \text{ a } v \in V \quad (5.4)$$

$$\sum_{v \in V} z_{iv} = 1 \quad \text{pro } i \in A_k \text{ a } k \in K \quad (5.5)$$

$$\sum_{i \in AU\{0\}} x_{ij} = 1 \quad \text{pro } j \in A \quad (5.6)$$

$$w_i \leq au_i \quad \text{pro } i \in A \quad (5.7)$$

$$w_{vk} \leq au_{vk} \quad \text{pro } v \in V, k \in K \quad (5.8)$$

$$w_i \geq 0 \quad \text{pro } i \in A \quad (5.9)$$

$$w_{vk} \geq 0 \quad \text{pro } v \in V, k \in K \quad (5.10)$$

$$h_i \geq 0 \quad \text{pro } i \in A \quad (5.11)$$

$$z_{iv} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } i \in A \text{ a } v \in V \quad (5.12)$$

Hodnota účelové funkce (5.1) je složená ze tří členů. V navrženém matematickém modelu se v účelové funkci nachází tři kritéria s různými jednotkami. K řešení vícekritériálních optimalizačních úloh se dá přistoupit různými metodami.

Jedním ze způsobů je tzv. skalarizace. V rámci tohoto přístupu se řešitelé snaží veličiny s různými jednotkami transformovat na jednu společnou veličinu. Tento přístup je možný i v případě řešené úlohy, protože takováto veličina existuje (jsou to např. celkové náklady plynoucí z počtu použitých vozidel, neproduktivně ujeté vzdálenosti a plynoucí z časových ztrát). Proces převedení všech kritérií na jedno společné je však z pohledu optimalizované úlohy zbytečně komplikovaný, navíc nákladové vyjádření např. časových ztrát cestujících je víceméně nemožné. Proto bude použit náhradní způsob – koncentrace všech tří kritérií do jediného. Nevýhodou náhradního přístupu je, že zachovává jednotkovou různorodost, nicméně uvedená nevýhoda je, vzhledem k pracnosti nákladových kalkulací, které by bylo potřeba provést v případě skalarizace, zanedbatelná.

První složku účelové funkce tvoří výraz, který reprezentuje celkovou časovou ztrátu všech přestupujících cestujících, druhou složku představuje celkový počet vozidel nasazených k obsluze dané množiny spojů a poslední složku tvoří výraz reprezentující celkovou neproduktivně ujetou vzdálenost, kterou vozidla musí absolvovat při přejezdech mezi spoji. Je ovšem patrné, že každá z uvedených složek se musí vyznačovat jinou váhou (nasazení jednoho vozidla totiž nemá stejnou váhu – nevyvolá stejné náklady, jako náklady na ujetí jednoho kilometru neproduktivně ujeté vzdálenosti při přejezdu). Nastavení vah jednotlivých složek účelové funkce je nutno realizovat v závislosti na hodnotách vstupních údajů. Způsob zabránění výběru nebo eliminace určité varianty v optimalizačních úlohách souvisí s typem extrému optimalizačního kritéria, který se hledá. Je-li třeba zabránit výběru určité varianty, je nutné tuto variantu z pohledu hledaného typu extrému výrazně znevýhodnit (penalizovat). Z toho vyplývá, že prostřednictvím prohibitivní konstanty je zvýrazněno kritérium počet nasazených vozidel na obsluhu. V řešené úloze se u optimalizačního kritéria hledá minimum.

Skupiny omezujících podmínek (5.2) a (5.3) vytvářejí logické vazby mezi proměnnými reprezentujícími jednotlivá rozhodnutí v části úlohy věnované koordinaci spojů v přestupních uzlech. Skupina omezujících podmínek (5.4) zajistí, že naplánované oběhy vozidel budou časově přípustné.

Skupina podmínek (5.5) říká, že každý příjezdějící spoj musí být navázán na právě jeden odjíždějící. Skupina omezujících podmínek (5.6) zajistí, že k obsluze každého spoje $i \in A$ se přijede autobus právě z jednoho směru. Skupiny podmínek (5.7) a (5.8) zajistí, že při posunech spojů nebudou překročeny jejich maximální možné posuny. Skupiny omezujících podmínek (5.9) – (5.12) reprezentují definiční obory proměnných.

6 VÝPOČTY SOUVISEJÍCÍ S OVĚŘENÍM FUNKČNOSTI MODELU

Na základě výše sestaveného matematického modelu, bude v této kapitole ověřena funkčnost modelu v programu v jazyku Mosel, se kterým pracuje optimalizační software Xpress-IVE.

6.1 Zadání prvního ověřovacího experimentu

Jsou dány 2 koordinační uzly, ze kterých odjíždí vlakové spoje. Uvažujeme 3 autobusové spoje, pro které je známá doba spoje, nejdříve možný čas odjezdu z výchozí zastávky a maximální dovolený časový posun. Příjezdy autobusových spojů je nutno koordinovat s odjezdy vlaků v přestupních uzlech. Pro každý autobusový spoj je definována intenzita přestupujících cestujících. Přestupní doba pro cestující je 5 minut. Další údaje jsou uvedeny v tab. č. 6.1 a 6.2.

Tab. č. 6.1: Časy odjezdů z výchozí zastávky a intenzity přestupujících cestujících

Číslo autobusového spoje	1	2	3
čas příjezdu	8:10	8:15	9:15
intenzita	1	0	1

Tab. č. 6.2 Nejdříve možné odjezdy vlaků z koordinačního uzlu 1 a 2

	1	2
čas odjezdu	10:00	10:20

6.2 Text programu prvního ověřovacího experimentu v programu Xpress-IVE

Text programu v programovacím jazyce Model má tvar:

```
model Koordinace
uses "mmxprs";
declarations
m=3                !autobusové spoje
n1=1               !počet koordinovaných vlaků v uzlu1
n2=1               !počet koordinovaných vlaků v uzlu2
k=2                !koordinační uzly
```

```

tpres=5
M=1000000
uzel=1..k
spojaut=1..m
spojvlak1=1..n1 !vlakové spoje v uzlu 1
spojvlak2=1..n2      !vlakové spoje v uzlu 2
toda:array(spojaut)of real      !čas nejdříve možného odjezdu autobusového spoje
z výchozí zastávky
todv1:array(spojvlak1)of real    !čas nejdříve možného odjezdu vlakového spoje z uzlu 1
todv2:array(spojvlak2)of real    !čas nejdříve možného odjezdu vlakového spoje z uzlu 2
T:array(spojaut)of real          !doba spoje
aa:array(spojaut)of real         !maximální dovolený posun autobusového spoje
au1:array(spojvlak1)of real      !maximální dovolený posun vlakového spoje v uzlu 1
au2:array(spojvlak2)of real      !maximální dovolený posun vlakového spoje v uzlu 2
f:array(spojaut)of real          !u spojů, které nekončí na vlakovém nádraží, bude hodnota
0
d:array(0..m,spojaut)of real     !neproduktivně ujetá vzdálenost mezi autobusovými spoji
r:array(0..m,spojaut)of real     !doba potřebná k projetí vzdálenosti d (i,j)
h:array(spojaut)of mpvar         !čekání od autobusového spoje, který přijel do uzlu
x:array(0..m,spojaut)of mpvar
wa:array(spojaut)of mpvar
wv1:array(spojvlak1)of mpvar
wv2:array(spojvlak2)of mpvar
z1:array(1..1,spojvlak1)of mpvar
z2:array(3..3,spojvlak2)of mpvar
end-declarations
toda::[10,15,75]
todv1::[120]
todv2::[140]
T::[13,20,35]
aa::[0,30,20]
au1::[0]
au2::[0]
f::[1,0,1]
d::[0,0,0,10000,5,10,10,10000,5,10,10,10000]
r::[0,0,0,10000,5,10,10,10000,5,10,10,10000]

```



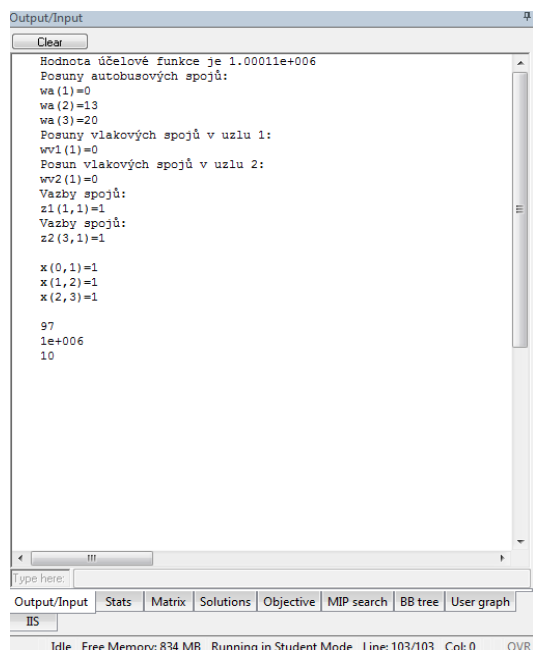
```

forall(i in 1..1,j in spojvlak1)z1(i,j)is_binary
forall(i in 3..3,j in spojvlak2)z2(i,j)is_binary
forall(i in 0..m,j in spojaut)x(i,j)is_binary
forall(i in 1..1,j in spojvlak1)(todv1(j)+wv1(j))-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres)>=M*(z1(i,j)-1)
forall(i in 1..1,j in spojvlak1)(todv1(j)+wv1(j))-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres)<=h(i)+M*(1-z1(i,j))
forall(i in 3..3,j in spojvlak2)(todv2(j)+wv2(j))-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres)>=M*(z2(i,j)-1)
forall(i in 3..3,j in spojvlak2)(todv2(j)+wv2(j))-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres)<=h(i)+M*(1-z2(i,j))
forall(i in 1..1)sum(j in spojvlak1)z1(i,j)=1
forall(i in 3..3)sum(j in spojvlak2)z2(i,j)=1
forall(j in spojaut)sum(i in 0..m)x(i,j)=1
forall(i in 1..m)sum(j in 1..m)x(i,j)<=1
forall(i in spojaut)wa(i)<=aa(i)
forall(i in spojvlak1)wv1(i)<=au1(i)
forall(i in spojvlak2)wv2(i)<=au2(i)
forall(i in spojaut,j in spojaut)toda(i)+wa(i)+T(i)+r(i,j)<=toda(j)+wa(j)+M*(1-x(i,j))
HUF:=sum(i in spojaut)f(i)*h(i)+sum(j in spojaut)M*x(0,j)+sum(i in spojaut,j in spojaut)d(i,j)*x(i,j)
minimize(HUF)
writeln("Hodnota účelové funkce je ",getobjval)
writeln("Posuny autobusových spojů:")
forall(i in spojaut)writeln("wa(",i,")=",getsol(wa(i)))
writeln("Posuny vlakových spojů v uzlu 1:")
forall(i in spojvlak1)writeln("wv1(",i,")=",getsol(wv1(i)))
writeln("Posun vlakových spojů v uzlu 2:")
forall(j in spojvlak2)writeln("wv2(",j,")=",getsol(wv2(j)))
writeln("Vazby spojů:")
forall(i in 1..1,j in spojvlak1|getsol(z1(i,j))>0)writeln("z1(",i,"," ,j,")=",getsol(z1(i,j)))
writeln("Vazby spojů:")
forall(i in 3..3,j in spojvlak2|getsol(z2(i,j))>0)writeln("z2(",i,"," ,j,")=",getsol(z2(i,j)))
writeln
forall(i in 0..m,j in spojaut|getsol(x(i,j))>0)writeln("x(",i,"," ,j,")=",getsol(x(i,j)))
writeln
writeln(getsol(sum(i in spojaut)f(i)*h(i)))
writeln(getsol(sum(j in spojaut)M*x(0,j)))
writeln(getsol(sum(i in spojaut,j in spojaut)d(i,j)*x(i,j)))
end-model

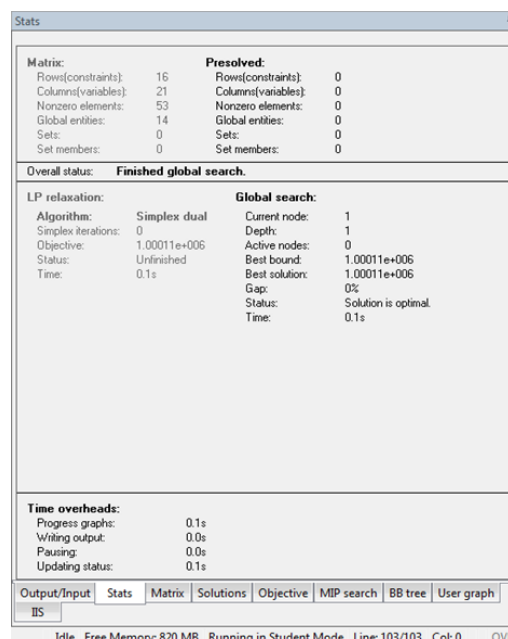
```

6.3 Výsledky výpočtu prvního experimentu

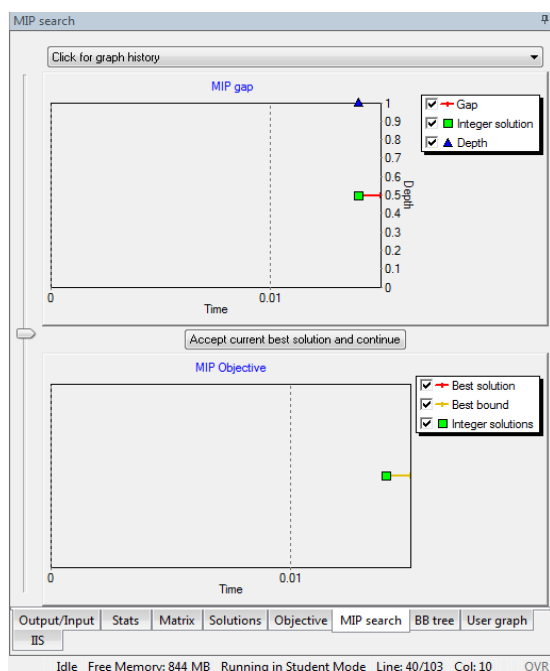
Z dosažených výsledků, viz obr. č. 6.1 – 6.3, je patrné, že k obsluze zadané množiny spojů je zapotřebí 1 vozidlo. Aby jedno vozidlo stihlo obsloužit všechny spoje, musí dojít k posunu odjezdu autobusového spoje č. 2 a to o 13 minut.



Obr. 6.1 Výsledek výpočtu – záložka Output/Input



Obr. 6.2. Nalezení optima – záložka Stats

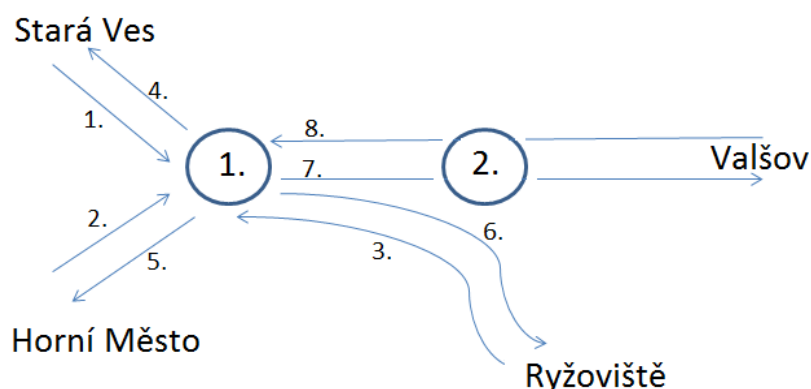


Obr. 6.3. Průběh výpočtu – záložka MIP search

6.4 Zadání druhého ověřovacího experimentu

Pro potřeby řešení případové studie muselo dojít k dílčí transformaci prvního modelového příkladu. Vrchol 1 reprezentuje přestupní uzel Rýmařov, vrchol 2 reprezentuje přestupní uzel Břidličná.

Nově je definováno 8 směrů, ve kterých je nutno vytvořit koordinaci, množina 12 autobusových a 4 vlakových spojů.



Obr. 6.4 Dopravní síť

Označení hran čísly 1 – 8 odpovídá značení směrů. V zadané dopravní síti bylo nutné sestavit pro každý směr dostupné spoje. Dále v síti vidíme označení přestupních uzlů. Přestupní uzel číslo jedna představuje město Rýmařov a přestupní uzel číslo dvě představuje město Břidličná. Směry 7 a 8 se týkají vlakové dopravy, ostatní směry jsou obsluhovány autobusovou dopravou.

Úkolem je sledovat turnusovou potřebu vozidel, v závislosti na velikosti intervalů, ve kterých bude možno se spoji posouvat v čase.

Pro každý spoj je známa jeho časová poloha a dovolené časové posuny. S časovými posuny odjezdů vlaků se neuvažuje. Cílem modelu je vytvoření posloupnosti obsluhy spojů s co nejmenším počtem použitých vozidel a minimální časovou ztrátou přestupujících cestujících. Podmínkou je, že na každý příjezdějící spoj musí být vazba na alespoň jeden odjíždějící spoj.

Vstupní údaje pro výpočetní experiment jsou shrnuty v tab. č. 6.3.

Tab. č. 6.3 Vstupní údaje pro výpočetní experiment

Vazba spojů směr - směr	koordinace na vlakové spoje v uzlu	Odjezdy z výchozí stanice do koordinačního uzlu	Odjezdy z koordinačního uzlu (1/2) do určeného směru
1 → 7	1	8:00; 10:00	9:00; 11:00
1 → 5	1	8:00; 10:00	9:00; 11:30
1 → 6	1	8:00; 10:00	9:00; 12:00
2 → 4	1	8:20; 10:20	10:00; 13:00
2 → 7	1	8:20; 10:20	9:00; 11:00
2 → 6	1	8:20; 10:20	9:00; 12:00
3 → 4	1	7:30; 8:20	10:00; 13:00
3 → 7	2	7:30; 8:20	9:00; 11:00
3 → 5	1	7:30; 8:20	9:00; 11:30
8 → 4	1	9:40; 11:40	10:00; 13:00
8 → 5	1	9:40; 11:40	9:00; 11:00
8 → 6	2	9:40; 11:40	9:00; 12:00

6.5 Text programu druhého ověřovacího experimentu v programu Xpress-IVE

Text programu v programovacím jazyce Model má tvar:

```
model Koordinace
uses "mmxprs";
declarations
m=12 !autobusové spoje
n1=2  !počet koordinovaných vlaků v uzlu1
n2=2  !počet koordinovaných vlaků v uzlu2
M=1000000
spojaut=1..m
```

spojvlakprij=1..n1 !vlakové spoje v uzlu 1
 spojvlakodj=1..n2 !vlakové spoje v uzlu 2
 smer1=1..2
 smer2=3..4
 smer3=5..6
 smer4=7..8
 smer5=9..10
 smer6=11..12
 smer7=13..14
 smer8=15..16
 toda:array(spojaut)of real !čas nejdříve možného odjezdu autobusového spoje z výchozí zastávky
 todv:array(smer7)of real !čas nejdříve možných odjezdů vlakových spojů z Rýmařova, časy odjezdů z Břidličné budou posunuty
 tprv:array(smer8)of real !čas nejdříve možných příjezdů vlakových spojů do Rýmařova, časy příjezdů do Břidličné budou přesunuty
 T:array(spojaut)of real !doba spoje
 aa:array(spojaut)of real !maximální dovolený posun autobusového spoje
 av1:array(smer8)of real !maximální dovolené posuny vlakových spojů odjíždějících z Rýmařova
 av2:array(smer7)of real !maximální dovolené posuny vlakových spojů přijíždějících do Rýmařova
 fa:array(spojaut)of real
 fv1:array(15..16)of real
 d:array(0..m,spojaut)of real !neproduktivně ujetá vzdálenost mezi autobusovými spoji
 r:array(0..m,spojaut)of real !doba potřebná k projetí vzdálenosti d(i,j)
 h1:array(smer1)of mpvar !čekání od autobusového spoje, které přijely do uzlu ze směru 1
 h2:array(smer2)of mpvar !čekání od autobusového spoje, který přijel do uzlu ze směru 2
 h3:array(smer3)of mpvar !čekání od autobusového spoje, který přijel do uzlu
 h8:array(smer8)of mpvar !čekání od autobusového spoje, který přijel do uzlu
 x:array(0..m,spojaut)of mpvar !přejezdy autobusů mezi spoji
 wa:array(spojaut)of mpvar !posuny autobusových spojů
 ww1:array(smer8)of mpvar !posuny přijíždějících vlakových spojů
 ww2:array(smer7)of mpvar !posuny odjíždějících vlakových spojů
 z15:array(smer1,smer5)of mpvar !z1 reprezentuje vazby ze směru 1
 z16:array(smer1,smer6)of mpvar

```

z17:array(smer1,smer7)of mpvar
z24:array(smer2,smer4)of mpvar      !z2 reprezentuje vazby ze směru 2
z26:array(smer2,smer6)of mpvar
z27:array(smer2,smer7)of mpvar
z34:array(smer3,smer4)of mpvar      !z3 reprezentuje vazby ze směru 3
z35:array(smer3,smer5)of mpvar
z37:array(smer3,smer7)of mpvar
z84:array(smer8,smer4)of mpvar      !z8 reprezentuje vazby ze směru 8
z85:array(smer8,smer5)of mpvar
z86:array(smer8,smer6)of mpvar
end-declarations

tba:=25
tbv:=15
tpres17:=5
tpres15:=5
tpres16:=5
tpres24:=5
tpres27:=5
tpres26:=5
tpres34:=5
tpres37:=10
tpres35:=5
tpres84:=5
tpres85:=5
tpres86:=5
toda:=[90,210,100,220,30,80,240,420,180,330,180,360]
todv:=[190,310]
tprv:=[180,300]
T:=[30,30,40,40,60,60,30,30,40,40,60,60]
aa:=[60,60,60,60,60,60,60,60,60,60,60,60]
av1:=[0]
av2:=[0]
fa:=[5,100,5,5,5,100,5,5,5,5,5,5]
d:=[0,0,0,10000,5,10,10,10000,5,10,10,10000]
r:=[0,0,0,10000,5,10,10,10000,5,10,10,10000]

```

```

forall(i in smer1,j in smer5)z15(i,j)is_binary
forall(i in smer1,j in smer6)z16(i,j)is_binary
forall(i in smer1,j in smer7)z17(i,j)is_binary
forall(i in smer2,j in smer4)z24(i,j)is_binary
forall(i in smer2,j in smer6)z26(i,j)is_binary
forall(i in smer2,j in smer7)z27(i,j)is_binary
forall(i in smer3,j in smer4)z34(i,j)is_binary
forall(i in smer3,j in smer5)z35(i,j)is_binary
forall(i in smer3,j in smer7)z37(i,j)is_binary
forall(i in smer8,j in smer4)z84(i,j)is_binary
forall(i in smer8,j in smer5)z85(i,j)is_binary
forall(i in smer8,j in smer6)z86(i,j)is_binary
forall(i in 0..m,j in spojaut)x(i,j)is_binary
forall(i in smer1,j in smer5)toda(j)+wa(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres15)>=M*(z15(i,j)-1)
forall(i in smer1,j in smer6)toda(j)+wa(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres16)>=M*(z16(i,j)-1)
forall(i in smer1,j in smer7)todv(j)+wv2(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres17)>=M*(z17(i,j)-1)
forall(i in smer2,j in smer4)toda(j)+wa(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres24)>=M*(z24(i,j)-1)
forall(i in smer2,j in smer6)toda(j)+wa(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres26)>=M*(z26(i,j)-1)
forall(i in smer2,j in smer7)todv(j)+wv2(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres27)>=M*(z27(i,j)-1)
forall(i in smer3,j in smer4)toda(j)+wa(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres34)>=M*(z34(i,j)-1)
forall(i in smer3,j in smer5)toda(j)+wa(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres35)>=M*(z35(i,j)-1)
forall(i in smer3,j in smer7)todv(j)+tbv+wv2(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)-tbv+tpres37)>=M*(z37(i,j)-1)
forall(i in smer8,j in smer4)toda(j)+wa(j)-(tprv(i)+wv1(i)+tpres84)>=M*(z84(i,j)-1)
forall(i in smer8,j in smer5)toda(j)+wa(j)-(tprv(i)+wv1(i)+tpres85)>=M*(z85(i,j)-1)
forall(i in smer8,j in smer6)toda(j)+tba+wa(j)-(tprv(i)+wv1(i)-tba+tpres86)>=M*(z86(i,j)-1)
forall(i in smer1,j in smer5)toda(j)+wa(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres15)<=h1(i)+M*(1-z15(i,j))
forall(i in smer1,j in smer6)toda(j)+wa(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres16)<=h1(i)+M*(1-z16(i,j))
forall(i in smer1,j in smer7)todv(j)+wv2(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres17)<=h1(i)+M*(1-z17(i,j))
forall(i in smer2,j in smer4)toda(j)+wa(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres24)<=h2(i)+M*(1-z24(i,j))
forall(i in smer2,j in smer6)toda(j)+wa(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres26)<=h2(i)+M*(1-z26(i,j))
forall(i in smer2,j in smer7)todv(j)+wv2(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres27)<=h2(i)+M*(1-z27(i,j))
forall(i in smer3,j in smer4)toda(j)+wa(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres34)<=h3(i)+M*(1-z34(i,j))
forall(i in smer3,j in smer5)toda(j)+wa(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres35)<=h3(i)+M*(1-z35(i,j))
forall(i in smer3,j in smer7)todv(j)+tbv+wv2(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)-tbv+tpres37)<=h3(i)+M*(1-z37(i,j))
forall(i in smer8,j in smer4)toda(j)+wa(j)-(tprv(i)+wv1(i)+tpres84)<=h8(i)+M*(1-z84(i,j))

```

```

forall(i in smer8,j in smer5)toda(j)+wa(j)-(tprv(i)+wv1(i)+tpres85)<=h8(i)+M*(1-z85(i,j))
forall(i in smer8,j in smer6)toda(j)+tba+wa(j)-(tprv(i)+wv1(i)-tba+tpres86)<=h8(i)+M*(1-z86(i,j))
forall(i in smer1)sum(j in smer5)z15(i,j)=1
forall(i in smer1)sum(j in smer6)z16(i,j)=1
forall(i in smer1)sum(j in smer7)z17(i,j)=1
forall(i in smer2)sum(j in smer4)z24(i,j)=1
forall(i in smer2)sum(j in smer6)z26(i,j)=1
forall(i in smer2)sum(j in smer7)z27(i,j)=1
forall(i in smer3)sum(j in smer4)z34(i,j)=1
forall(i in smer3)sum(j in smer5)z35(i,j)=1
forall(i in smer3)sum(j in smer7)z37(i,j)=1
forall(i in smer8)sum(j in smer4)z84(i,j)=1
forall(i in smer8)sum(j in smer5)z85(i,j)=1
forall(i in smer8)sum(j in smer6)z86(i,j)=1
forall(j in spojaut)sum(i in 0..m)x(i,j)=1
forall(i in 1..m)sum(j in 1..m)x(i,j)<=1
forall(i in spojaut)wa(i)<=aa(i)
forall(i in smer8)wv1(i)<=av1(i)
forall(i in smer7)wv2(i)<=av2(i)
forall(i in spojaut,j in spojaut)toda(i)+wa(i)+T(i)+r(i,j)<=toda(j)+wa(j)+M*(1-x(i,j))
HUF:=sum(i in smer1)fa(i)*h1(i)+sum(i in smer2)fa(i)*h2(i)+sum(i in smer3)fa(i)*h3(i)+sum(i in
smer8)fv1(i)*h8(i)+sum(j in spojaut)M*x(0,j)+sum(i in spojaut,j in spojaut)d(i,j)*x(i,j)
minimize(HUF)
writeln("Hodnota účelové funkce je ",getobjval)
writeln("Posuny autobusových spojů:")
forall(i in spojaut)writeln("wa(",i,")=",getsol(wa(i)))
writeln("Posuny vlakových spojů:")
forall(i in smer8)writeln("wv1(",i,")=",getsol(wv1(i)))
forall(j in smer7)writeln("wv2(",j,")=",getsol(wv2(j)))
writeln("Vazby mezi spoji:")
forall(i in smer1,j in smer5|getsol(z15(i,j))>0)writeln("z15(",i,"," ,j,")=",getsol(z15(i,j)))
forall(i in smer1,j in smer6|getsol(z16(i,j))>0)writeln("z16(",i,"," ,j,")=",getsol(z16(i,j)))
forall(i in smer1,j in smer7|getsol(z17(i,j))>0)writeln("z17(",i,"," ,j,")=",getsol(z17(i,j)))
forall(i in smer2,j in smer4|getsol(z24(i,j))>0)writeln("z24(",i,"," ,j,")=",getsol(z24(i,j)))
forall(i in smer2,j in smer6|getsol(z26(i,j))>0)writeln("z26(",i,"," ,j,")=",getsol(z26(i,j)))

```



```

forall(i in smer2,j in smer7|getsol(z27(i,j))>0)writeln("z27(",i,"",j,"")=",getsol(z27(i,j)))
forall(i in smer3,j in smer4|getsol(z34(i,j))>0)writeln("z34(",i,"",j,"")=",getsol(z34(i,j)))
forall(i in smer3,j in smer5|getsol(z35(i,j))>0)writeln("z35(",i,"",j,"")=",getsol(z35(i,j)))
forall(i in smer3,j in smer7|getsol(z37(i,j))>0)writeln("z37(",i,"",j,"")=",getsol(z37(i,j)))
forall(i in smer8,j in smer4|getsol(z84(i,j))>0)writeln("z84(",i,"",j,"")=",getsol(z84(i,j)))
forall(i in smer8,j in smer5|getsol(z85(i,j))>0)writeln("z85(",i,"",j,"")=",getsol(z85(i,j)))
forall(i in smer8,j in smer6|getsol(z86(i,j))>0)writeln("z86(",i,"",j,"")=",getsol(z86(i,j)))
forall(i in 0..m,j in spojaut|getsol(x(i,j))>0)writeln("x(",i,"",j,"")=",getsol(x(i,j)))
writeln(getsol(sum(i in smer1)fa(i)*h1(i)))
writeln(getsol(sum(j in spojaut)M*x(0,j)))
writeln(getsol(sum(i in spojaut,j in spojaut)d(i,j)*x(i,j)))
end-model

```

6.6 Výsledky výpočtu druhého ověřovacího příkladu

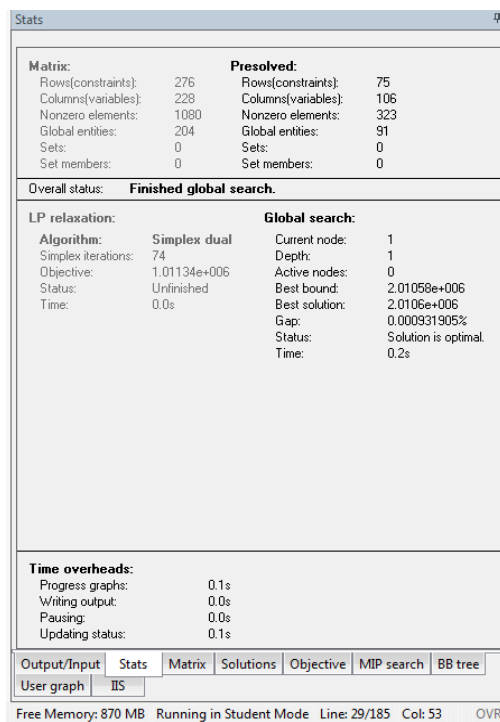
Dosažené výsledky jsou shrnuty v tab. č. 6. 4.

Tab. č. 6.4 Výsledky optimalizačního výpočtu

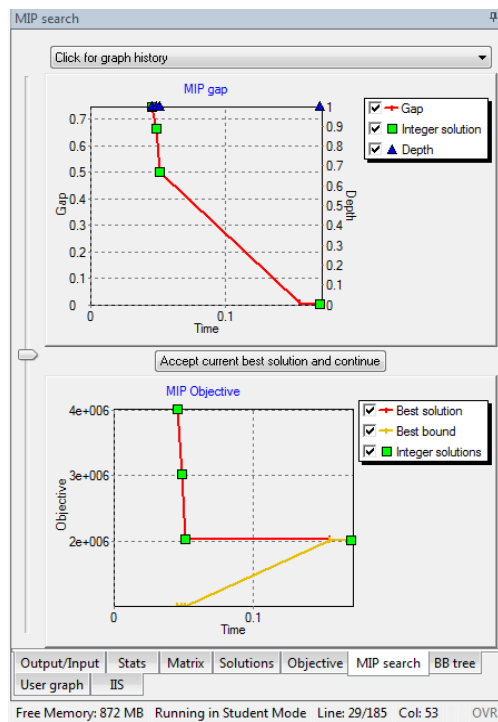
Posuny autobusových spojů [min]	Posuny vlakových spojů [min]	Vazby mezi spoji	Přejezd vozidla po obsluze spoje $i \in A$ k obsluze spoje $j \in A$
wa(1)=55	wv1(15)=0	z15(1,9)=1	x(0,3)=1
wa(2)=60	wv1(16)=0	z15(2,10)=1	x(0,5)=1
wa(3)=0	wv2(13)=0	z16(1,11)=1	x(1,11)=1
wa(4)=45	wv2(14)=0	z16(2,12)=1	x(2,12)=1
wa(5)=55		z17(1,13)=1	x(3,6)=1
wa(6)=60		z17(2,14)=1	x(4,10)=1
wa(7)=0		z24(3,7)=1	x(5,1)=1
wa(8)=0		z24(4,8)=1	x(6,9)=1
wa(9)=25		z26(3,11)=1	x(7,2)=1
wa(10)=0		z26(4,12)=1	x(9,4)=1

$wa(11)=0$		$z_{27}(3,13)=1$	$x(11,7)=1$
$wa(12)=0$		$z_{27}(4,14)=1$	$x(12,8)=1$
		$z_{34}(5,7)=1$	
		$z_{34}(6,7)=1$	
		$z_{35}(5,9)=1$	
		$z_{35}(6,9)=1$	
		$z_{37}(5,13)=1$	
		$z_{37}(6,13)=1$	
		$z_{84}(15,7)=1$	
		$z_{84}(16,8)=1$	
		$z_{85}(15,10)=1$	
		$z_{85}(16,10)=1$	
		$z_{86}(15,11)=1$	
		$z_{86}(16,12)=1$	

Z dosažených výsledků, viz tab. č. 6.4 a obr. č. 6.5 – 6.6, je patrné, že při navržených časových posunech odjezdů autobusových spojů, jsou potřeba k obsluze všech 12 autobusových spojů pouze 2 vozidla. Oběhy jednotlivých vozidel je možno vyjádřit posloupnostmi spojů 0 – 3 – 6 – 9 – 4 – 10 a 0 – 5 – 1 – 11 – 7 – 2 – 12 – 8.



Obr. 6.5 Nalezení optima – záložka Stats



Obr. 6.6 Průběh výpočtu – záložka MIP search

7 PŘÍPADOVÁ STUDIE

Pro případovou studii byly uvažovány především obce Stará Ves, Horní Město a Ryžoviště v dopoledních hodinách pracovního dne. Frekvence autobusových spojů v dopoledním sedle je nízká – 8 příjezdů do přestupního uzlu Rýmařov a 7 odjezdů z přestupního uzlu Rýmařov.

Z hlediska prostorového uspořádání se jedná o stejnou situaci jako v případě druhého ověřovacího experimentu.

Vzhledem k nízké frekvenci spojů vzrůstá význam časové koordinace a současně možnost úspor v počtu použitých vozidel. Pro ostatní cestující z obcí Rýmařovska je přirozený jiný spádový přestupní uzel. Obce Velká Štáhle a Břidličná leží na hlavní trati č. 310. Pro obce Dolní Moravice a Malá Morávka existují přirozené přestupní vazby na vlakové spoje v železniční stanici Bruntál.

Tab. č. 7.1 Výpis linek, jejichž výchozí zastávkou je Rýmařov aut. zast. v době od 8-12 hod [8]

Číslo linky	Obsluhovaný úsek	Odjezd z výchozí zastávky	Příjezd do cílové zastávky
850873	Rýmařov – Václavov - Bruntál	x	x
850875	Rýmařov – Břidličná - Olomouc	x	x
850876	Rýmařov – Břidličná – Lomnice	12:00	12:40
850877	Rýmařov – Břidličná – Bruntál	8:45	9:40
		9:50	10:40
		11:15	12:10
850878	Rýmařov – Malá Morávka, Karlov	x	x
850879	Rýmařov – Dolní Moravice, Nová Ves	x	x
850880	Rýmařov – Stará Ves, Žďárský Potok	9:45	10:05
		11:45	12:00
850881	Rýmařov – Tvrdkov, Ruda - Uničov	x	x

850883	Rýmařov – Jiřikov, Sovinec - Šternberk	10:00	10:48
890711	Rýmařov – Bruntál – Huzová – Šternberk - Olomouc	x	x
890726	Ovčárna – Karlova Studánka - Malá Morávka – Rýmařov - Olomouc	x	x
890727	Karlov - Malá Morávka, Ovčárna točna SKIBUS – Malá Morávka – Rýmařov - Olomouc	x	x
890760	Rýmařov – Horní Město – Uničov	x	x
901131	Rýmařov - Bruntál – Opava - Ostrava	x	x

Tab. č.7.2 Výpis linek, jejichž cílovou zastávkou je Rýmařov aut. zast. v době od 8-12 hod [8]

Číslo linky	Obsluhovaný úsek	Odjezd z výchozí zastávky	Příjezd do cílové zastávky
850873	Bruntál – Václavov - Rýmařov	8:00	8:30
		9:15	9:50
850875	Olomouc – Břidličná - Rýmařov	x	x
850876	Lomnice – Břidličná – Rýmařov	x	x
850877	Bruntál – Břidličná – Rýmařov	8:55	9:45
		10:25	11:15
		11:40	12:28
850878	Malá Morávka, Karlov - Rýmařov	x	x
850879	Dolní Moravice, Nová Ves - Rýmařov	x	x
850880	Stará Ves, Žďárský Potok - Rýmařov	8:10	8:23
		10:10	10:23
850881	Uničov - Tvrdkov, Ruda - Rýmařov	9:10	9:38

		11:55	12:23
850883	Šternberk - Jiřikov, Sovinec - Rýmařov	11:00	11:40
890711	Olomouc – Šternberk – Huzová – Bruntál - Rýmařov	x	x
890726	Olomouc – Rýmařov – Malá Morávka, Ovčárna – Karlova Studánka	x	x
890727	Olomouc – Rýmařov – Malá Morávka, Karlov – Malá Morávka, Ovčárna točna SKIBUS	x	x
890760	Uničov – Horní Město – Rýmařov	x	x
910131	Ostrava – Opava – Bruntál – Rýmařov	x	x

7.1 Podklady pro optimalizační výpočet

Tab. č. 7.3 Podklady pro výpočet

vazba spojů směr - směr	koordinace na vlakové spoje v uzlu	odjezd z výchozí stanice do koordinačního uzlu	odjezdy z koordinačního uzlu (1/2) do určeného směru
1 → 7	1	8:10; 10:10	8:28; 10:28; 12:28
1 → 5	1	8:10; 10:10	8:35; 11:20
1 → 6	1	8:10; 10:10	9:50; 12:25
2 → 4	1	9:23; 12:07	8:00; 9:50; 11:50
2 → 7	1	9:23; 12:07	8:28; 10:28; 12:28
2 → 6	1	9:23; 12:07	9:50; 12:25
3 → 4	1	9:58	8:00; 9:50; 11:50
3 → 7	2	9:58	8:28; 10:28; 12:28
3 → 5	1	9:58	8:35; 11:20
8 → 4	1	9:41; 11:41	8:00; 9:50; 11:50
8 → 5	1	9:41; 11:41	8:35; 11:20
8 → 6	1	9:41; 11:41	9:50; 12:25

Interpretace hodnot z prvního řádku – cestujícím ze směru 1, tzn. ze Staré Vsi, vyjíždí v dopoledním sedle 2 autobusové spoje jedoucí do přestupního uzlu s odjezdy z výchozí zastávky v 8:10 a 10:10. Pokud chtějí cestující pokračovat směrem 7, tzn. vlakem do Valšova, vlakové spoje tímto směrem odjíždí v čase 8:28; 10:28 a 12:28.

Je známá neproduktivně ujetá vzdálenost mezi jednotlivými směry. Tato vzdálenost je uvedena v matici d_{ij} . Vysvětlení vyznačené hodnoty 6 – v případě, že po obsluze prvního spoje (Stará Ves → Rýmařov), by vozidlo mělo obsloužit spoj číslo 2, muselo by se vozidlo do výchozí zastávky přesunout po trase dlouhé 6 km.

Obdobné vysvětlení má i matice r_{ij} , ale hodnoty odpovídají době potřebné k ujetí vzdálenosti d_{ij} , při rychlosti jízdy $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

```
d:=[R,6,6,6,15,0,0,0,0,0,0,0,
    6,R,6,6,15,0,0,0,0,0,0,0,
    6,6,R,6,15,0,0,0,0,0,0,0,
    6,6,6,R,15,0,0,0,0,0,0,0,
    6,6,6,6,R,0,0,0,0,0,0,0,
    0,0,6,6,15,R,6,6,6,6,6,6,
    0,0,6,6,15,6,R,6,6,6,6,6,
    0,0,6,6,15,6,6,R,6,6,6,6,
    13,13,0,0,21,6,6,6,R,6,6,6,
    13,13,0,0,21,6,6,6,6,R,6,6,
    21,21,21,21,0,15,15,15,15,15,R,15,
    21,21,21,21,0,15,15,15,15,15,15,R]
```

7.2 Text programu

Text programu v programovacím jazyce Model má tvar:

```
model Koordinace
uses "mmxprs";
declarations
m=12                      !autobusové spoje
n1=2                      !počet koordinovaných vlaků v uzlu1
n2=3                      !počet koordinovaných vlaků v uzlu2
M=1000000
R=10000
spojaut=1..m
spojvlakprij=1..n1        !vlakové spoje v uzlu 1
spojvlakodj=1..n2        !vlakové spoje v uzlu 2
smer1=1..2
smer2=3..4
```


smer3=5..5

smer4=6..8

smer5=9..10

smer6=11..12

smer7=13..15

smer8=16..17

toda:array(spojaut)of real !čas nejdříve možného odjezdu autobusového spoje z výchozí zastávky

todv:array(smer7)of real !čas nejdříve možných odjezdů vlakových spojů z Rýmařova, časy odjezdů z Břidličné budou posunuty

tprv:array(smer8)of real !čas nejdříve možných příjezdů vlakových spojů do Rýmařova, časy příjezdů do Břidličné budou přesunuty

T:array(spojaut)of real !doba spoje

aa:array(spojaut)of real !maximální dovolený posun autobusového spoje

av1:array(smer8)of real !maximální dovolené posuny vlakových spojů odjíždějících z Rýmařova

av2:array(smer7)of real !maximální dovolené posuny vlakových spojů přijíždějících do Rýmařova

fa:array(spojaut)of real

fv1:array(16..17)of real

d:array(0..m,spojaut)of real !neproduktivně ujetá vzdálenost mezi autobusovými spoji

r:array(0..m,spojaut)of real !doba potřebná k projetí vzdálenosti d(i,j)

h1:array(smer1)of mpvar !čekání od autobusového spoje, které přijely do uzlu ze směru 1

h2:array(smer2)of mpvar !čekání od autobusového spoje, který přijel do uzlu ze směru 2

h3:array(smer3)of mpvar !čekání od autobusového spoje, který přijel do uzlu

h8:array(smer8)of mpvar !čekání od autobusového spoje, který přijel do uzlu

x:array(0..m,spojaut)of mpvar !přejezdy autobusů mezi spoji

wa:array(spojaut)of mpvar !posuny autobusových spojů

wv1:array(smer8)of mpvar !posuny přijíždějících vlakových spojů

wv2:array(smer7)of mpvar !posuny odjíždějících vlakových spojů

z15:array(smer1,smer5)of mpvar !z1 reprezentuje vazby ze směru 1

z16:array(smer1,smer6)of mpvar

z17:array(smer1,smer7)of mpvar

z24:array(smer2,smer4)of mpvar !z2 reprezentuje vazby ze směru 2

z26:array(smer2,smer6)of mpvar

z27:array(smer2,smer7)of mpvar

```

z34:array(smer3,smer4)of mpvar      !z3 reprezentuje vazby ze směru 3
z35:array(smer3,smer5)of mpvar
z37:array(smer3,smer7)of mpvar
z84:array(smer8,smer4)of mpvar      !z8 reprezentuje vazby ze směru 8
z85:array(smer8,smer5)of mpvar
z86:array(smer8,smer6)of mpvar
end-declarations

tba:=25
tbv:=15
tpres17:=5
tpres15:=5
tpres16:=5
tpres24:=5
tpres27:=5
tpres26:=5
tpres34:=5
tpres37:=10
tpres35:=5
tpres84:=5
tpres85:=5
tpres86:=5
toda::[10,130,83,247,172,0,110,230,35,200,110,265]
todv::[28,148,268]
tprv::[101,221]
T::[13,13,13,13,34,13,13,13,13,13,34,34]
aa::[10,10,10,10,10,10,10,10,40,10,26,10,10]
av1::[0]
av2::[0]
fa::[5,100,5,5,5,100,5,5,5,5,5,5]
d::[R,6,6,6,15,0,0,0,0,0,0,0,
    6,R,6,6,15,0,0,0,0,0,0,0,
    6,6,R,6,15,0,0,0,0,0,0,0,
    6,6,6,R,15,0,0,0,0,0,0,0,
    6,6,6,6,R,0,0,0,0,0,0,0,
    0,0,6,6,15,R,6,6,6,6,6,6,

```

```

0,0,6,6,15,6,R,6,6,6,6,6,
0,0,6,6,15,6,6,R,6,6,6,6,
13,13,0,0,21,6,6,6,R,6,6,6,
13,13,0,0,21,6,6,6,6,R,6,6,
21,21,21,21,0,15,15,15,15,15,R,15,
21,21,21,21,0,15,15,15,15,15,15,R]
r::[R,8,8,8,19,0,0,0,0,0,0,0,
8,R,8,8,19,0,0,0,0,0,0,0,
8,8,R,8,19,0,0,0,0,0,0,0,
8,8,8,R,19,0,0,0,0,0,0,0,
8,8,8,8,R,0,0,0,0,0,0,0,
0,0,8,8,19,R,8,8,8,8,8,8,
0,0,8,8,19,8,R,8,8,8,8,8,8,
0,0,8,8,19,8,8,R,8,8,8,8,8,
17,17,0,0,27,8,8,8,R,8,8,8,8,
17,17,0,0,27,8,8,8,8,R,8,8,8,
27,27,27,27,0,19,19,19,19,19,R,19,
27,27,27,27,0,19,19,19,19,19,19,R]
forall(i in smer1,j in smer5)z15(i,j)is_binary
forall(i in smer1,j in smer6)z16(i,j)is_binary
forall(i in smer1,j in smer7)z17(i,j)is_binary
forall(i in smer2,j in smer4)z24(i,j)is_binary
forall(i in smer2,j in smer6)z26(i,j)is_binary
forall(i in smer2,j in smer7)z27(i,j)is_binary
forall(i in smer3,j in smer4)z34(i,j)is_binary
forall(i in smer3,j in smer5)z35(i,j)is_binary
forall(i in smer3,j in smer7)z37(i,j)is_binary
forall(i in smer8,j in smer4)z84(i,j)is_binary
forall(i in smer8,j in smer5)z85(i,j)is_binary
forall(i in smer8,j in smer6)z86(i,j)is_binary
forall(i in 0..m,j in spojaut)x(i,j)is_binary
forall(i in smer1,j in smer5)toda(j)+wa(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres15)>=M*(z15(i,j)-1)
forall(i in smer1,j in smer6)toda(j)+wa(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres16)>=M*(z16(i,j)-1)
forall(i in smer1,j in smer7)todv(j)+wv2(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres17)>=M*(z17(i,j)-1)
forall(i in smer2,j in smer4)toda(j)+wa(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres24)>=M*(z24(i,j)-1)

```

```

forall(i in smer2,j in smer6)toda(j)+wa(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres26)>=M*(z26(i,j)-1)
forall(i in smer2,j in smer7)todv(j)+wv2(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres27)>=M*(z27(i,j)-1)
forall(i in smer3,j in smer4)toda(j)+wa(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres34)>=M*(z34(i,j)-1)
forall(i in smer3,j in smer5)toda(j)+wa(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres35)>=M*(z35(i,j)-1)
forall(i in smer3,j in smer7)todv(j)+tbv+wv2(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)-tba+tpres37)>=M*(z37(i,j)-1)
forall(i in smer8,j in smer4)toda(j)+wa(j)-(tprv(i)+wv1(i)+tpres84)>=M*(z84(i,j)-1)
forall(i in smer8,j in smer5)toda(j)+wa(j)-(tprv(i)+wv1(i)+tpres85)>=M*(z85(i,j)-1)
forall(i in smer8,j in smer6)toda(j)+tba+wa(j)-(tprv(i)+wv1(i)-tba+tpres86)>=M*(z86(i,j)-1)
forall(i in smer1,j in smer5)toda(j)+wa(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres15)<=h1(i)+M*(1-z15(i,j))
forall(i in smer1,j in smer6)toda(j)+wa(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres16)<=h1(i)+M*(1-z16(i,j))
forall(i in smer1,j in smer7)todv(j)+wv2(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres17)<=h1(i)+M*(1-z17(i,j))
forall(i in smer2,j in smer4)toda(j)+wa(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres24)<=h2(i)+M*(1-z24(i,j))
forall(i in smer2,j in smer6)toda(j)+wa(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres26)<=h2(i)+M*(1-z26(i,j))
forall(i in smer2,j in smer7)todv(j)+wv2(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres27)<=h2(i)+M*(1-z27(i,j))
forall(i in smer3,j in smer4)toda(j)+wa(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres34)<=h3(i)+M*(1-z34(i,j))
forall(i in smer3,j in smer5)toda(j)+wa(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)+tpres35)<=h3(i)+M*(1-z35(i,j))
forall(i in smer3,j in smer7)todv(j)+tbv+wv2(j)-(toda(i)+wa(i)+T(i)-tba+tpres37)<=h3(i)+M*(1-z37(i,j))
forall(i in smer8,j in smer4)toda(j)+wa(j)-(tprv(i)+wv1(i)+tpres84)<=h8(i)+M*(1-z84(i,j))
forall(i in smer8,j in smer5)toda(j)+wa(j)-(tprv(i)+wv1(i)+tpres85)<=h8(i)+M*(1-z85(i,j))
forall(i in smer8,j in smer6)toda(j)+tba+wa(j)-(tprv(i)+wv1(i)-tba+tpres86)<=h8(i)+M*(1-z86(i,j))
forall(i in smer1)sum(j in smer5)z15(i,j)=1
forall(i in smer1)sum(j in smer6)z16(i,j)=1
forall(i in smer1)sum(j in smer7)z17(i,j)=1
forall(i in smer2)sum(j in smer4)z24(i,j)=1
forall(i in smer2)sum(j in smer6)z26(i,j)=1
forall(i in smer2)sum(j in smer7)z27(i,j)=1
forall(i in smer3)sum(j in smer4)z34(i,j)=1
forall(i in smer3)sum(j in smer5)z35(i,j)=1
forall(i in smer3)sum(j in smer7)z37(i,j)=1
forall(i in smer8)sum(j in smer4)z84(i,j)=1
forall(i in smer8)sum(j in smer5)z85(i,j)=1
forall(i in smer8)sum(j in smer6)z86(i,j)=1
forall(j in spojaut)sum(i in 0..m)x(i,j)=1
forall(i in 1..m)sum(j in 1..m)x(i,j)<=1

```

```

forall(i in spojaut)wa(i)<=aa(i)
forall(i in smer8)wv1(i)<=av1(i)
forall(i in smer7)wv2(i)<=av2(i)
forall(i in spojaut,j in spojaut)toda(i)+wa(i)+T(i)+r(i,j)<=toda(j)+wa(j)+M*(1-x(i,j))
HUF:=sum(i in smer1)fa(i)*h1(i)+sum(i in smer2)fa(i)*h2(i)+sum(i in
smer3)fa(i)*h3(i)+sum(i in smer8)fv1(i)*h8(i)+sum(j in
spojaut)M*x(0,j)+sum(i in spojaut,j in spojaut)d(i,j)*x(i,j)
minimize(HUF)
writeln("Hodnota účelové funkce je ",getobjval)
writeln("Posuny autobusových spojů:")
forall(i in spojaut)writeln("wa(",i,")=",getsol(wa(i)))
writeln("Posuny vlakových spojů:")
forall(i in smer8)writeln("wv1(",i,")=",getsol(wv1(i)))
forall(j in smer7)writeln("wv2(",j,")=",getsol(wv2(j)))
writeln("Vazby mezi spoji:")
forall(i in smer1,j in smer5|getsol(z15(i,j))>0)writeln("z15(",i," ",j,")=",getsol(z15(i,j)))
forall(i in smer1,j in smer6|getsol(z16(i,j))>0)writeln("z16(",i," ",j,")=",getsol(z16(i,j)))
forall(i in smer1,j in smer7|getsol(z17(i,j))>0)writeln("z17(",i," ",j,")=",getsol(z17(i,j)))
forall(i in smer2,j in smer4|getsol(z24(i,j))>0)writeln("z24(",i," ",j,")=",getsol(z24(i,j)))
forall(i in smer2,j in smer6|getsol(z26(i,j))>0)writeln("z26(",i," ",j,")=",getsol(z26(i,j)))
forall(i in smer2,j in smer7|getsol(z27(i,j))>0)writeln("z27(",i," ",j,")=",getsol(z27(i,j)))
forall(i in smer3,j in smer4|getsol(z34(i,j))>0)writeln("z34(",i," ",j,")=",getsol(z34(i,j)))
forall(i in smer3,j in smer5|getsol(z35(i,j))>0)writeln("z35(",i," ",j,")=",getsol(z35(i,j)))
forall(i in smer3,j in smer7|getsol(z37(i,j))>0)writeln("z37(",i," ",j,")=",getsol(z37(i,j)))
forall(i in smer8,j in smer4|getsol(z84(i,j))>0)writeln("z84(",i," ",j,")=",getsol(z84(i,j)))
forall(i in smer8,j in smer5|getsol(z85(i,j))>0)writeln("z85(",i," ",j,")=",getsol(z85(i,j)))
forall(i in smer8,j in smer6|getsol(z86(i,j))>0)writeln("z86(",i," ",j,")=",getsol(z86(i,j)))
forall(i in 0..m,j in spojaut|getsol(x(i,j))>0)writeln("x(",i," ",j,")=",getsol(x(i,j)))
writeln(getsol(sum(i in smer1)fa(i)*h1(i)))
writeln(getsol(sum(j in spojaut)M*x(0,j)))
writeln(getsol(sum(i in spojaut,j in spojaut)d(i,j)*x(i,j)))
end-model

```

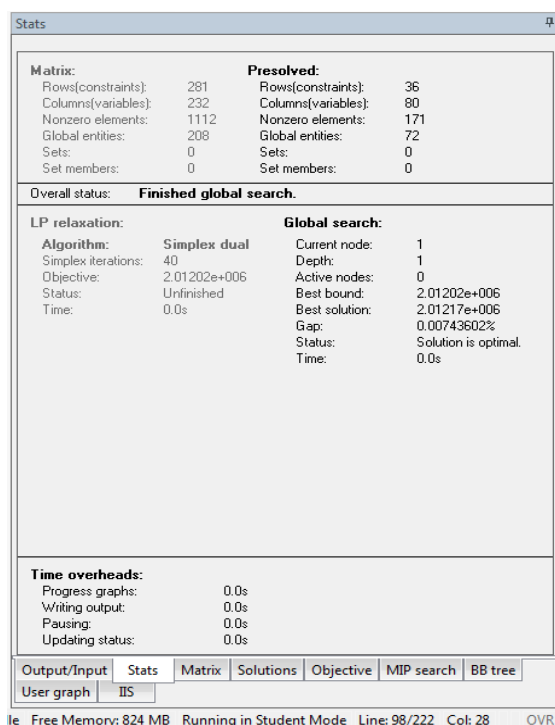
7.3 Výsledky výpočtu případové studie

Dosažené výsledky jsou shrnuty v tab. č. 7. 4.

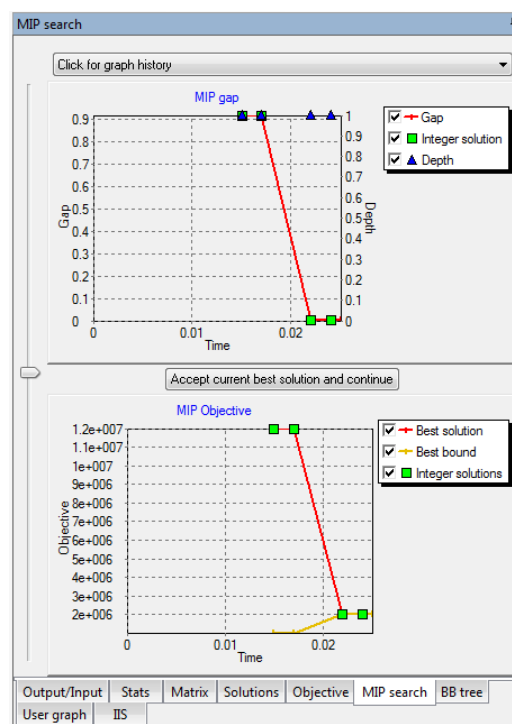
Tab. č. 7.4 Výsledky optimalizačního výpočtu

Posuny autobusových spojů [min]	Posuny vlakových spojů [hh:min]	Vazby mezi spoji	Přejezd vozidla po obsluze spoje $i \in A$ k obsluze spoje $j \in A$
wa(1)=10	wv1(16)=0	z15(1,9)=1	x(0,6)=1
wa(2)=10	wv1(17)=0	z15(2,10)=1	x(0,11)=1
wa(3)=10	wv2(13)=0	z16(1,11)=1	x(1,9)=1
wa(4)=3	wv2(14)=0	z16(2,12)=1	x(2,10)=1
wa(5)=10	wv2(15)=0	z17(1,14)=1	x(3,7)=1
wa(6)=0		z17(2,15)=1	x(4,8)=1
wa(7)=1		z24(3,7)=1	x(5,4)=1
wa(8)=38		z24(4,8)=1	x(6,1)=1
wa(9)=3		z26(3,11)=1	x(7,2)=1
wa(10)=26		z26(4,12)=1	x(9,3)=1
wa(11)=1		z27(3,14)=1	x(10,12)=1
wa(12)=3		z27(4,15)=1	x(11,5)=1
		z34(5,8)=1	
		z35(5,10)=1	
		z37(5,15)=1	
		z84(16,7)=1	
		z84(17,8)=1	
		z85(16,10)=1	
		z85(17,10)=1	
		z86(16,11)=1	

		$z86(17,12)=1$	
--	--	----------------	--



Obr. 7.2 Nalezení optima - záložka Stats



Obr. 7.3 Průběh výpočtů - záložka MIP search

Je zřejmé, že při navržených časových posunech odjezdů autobusových spojů, jsou potřeba k obsluze všech 12 autobusových spojů 2 vozidla. Přičemž vozidlo č. 1 bude obsluhovat spoje v následujícím pořadí: 6 – 1 – 9 – 3 – 7 – 2 – 10 – 12. Vozidlo č. 2 bude obsluhovat spoje v následujícím pořadí 11 – 5 – 4 – 8.

Nové časové polohy autobusových spojů jsou uvedeny v tab. č. 7.5.

Tab. č. 7.5 Časová koordinace spojů

Číslo autobusového spoje v modelu	Trasa spoje	Původní odjezdy spojů z výchozí zastávky [hh:min]	Odjezdy spojů po posunech [hh:min]
1	Stará Ves - Rýmařov	8:10	8:20
2	Stará Ves – Rýmařov	10:10	10:20

3	Horní Město – Rýmařov	9:23	9:33
4	Horní Město – Rýmařov	12:07	12:20
5	Ryžoviště – Rýmařov	9:58	10:08
6	Rýmařov – Stará Ves	8:00	8:00
7	Rýmařov – Stará Ves	9:50	9:51
8	Rýmařov – Stará Ves	11:50	12:28
9	Rýmařov – Horní Město	8:35	8:38
10	Rýmařov – Horní Město	11:20	11:46
11	Rýmařov – Ryžoviště	9:50	9:51
12	Rýmařov - Ryžoviště	12:25	12:25

Na obrázku 7.4a je znázorněn oběh vozidla č. 1. Vozidlo číslo jedna zvládne obsloužit 8 spojů. Červená barva v grafikonu znamená čekání vozidla na odjezd z výchozí zastávky. Zelená barva znázorňuje neproduktivně ujetou vzdálenost. Vozidlo vyjede z první výchozí zastávky (Rýmařov) v 8:00 a do poslední cílové zastávky (Ryžoviště) přijede ve 12:55, vozidlo je tedy v provozu celkem 295 minut. Vozidlo tráví čekáním na obsluhu dalšího spoje 56 % z celkové doby provozu. Neproduktivní vzdálenost jede vozidlo jen jednou a to ze směru Horní Město – Rýmařov, což odpovídá vzdálenosti 7 km.



Obr. 7. 4a Oběh vozidla č. 1

Na obrázku 7.4b je znázorněn oběh vozidla č. 2. Vozidlo obsluhuje zbývající 4 spoje. V tomto grafikonu se vyskytuje i modrá barva, která znázorňuje trasu vozidla do depa, ale tato vzdálenost nemusí být uvažována vždy, zejména v situaci, kdy tento spoj končí v odpoledních hodinách (v konkrétních případech je více než jasné, že vozidlo obsluhuje ještě další spoj). Vozidlo vyjede z první výchozí zastávky (Rýmařov) v 9:51 a do poslední cílové zastávky (Stará Ves) přijede ve 12:42, vozidlo je tedy v provozu celkem 171 minut. Vozidlo tráví čekáním na obsluhu dalšího spoje 57 % z celkové doby provozu (98 minut). Neproduktivní vzdálenost jede vozidlo jen jednou a to ze směru Rýmařov – Horní Město, což odpovídá vzdálenosti 7 km.



Obr. 7. 4b Oběh vozidla č. 2

7.4 Posouzení vlivu zvětšení maximálního dovoleného posunu autobusových spojů na použitý počet vozidel

V této části diplomové práce bude zkoumán vliv zvětšování maximálních dovolených posunů spojů na počet použitých vozidel. Dá se očekávat, že s rostoucí velikostí maximálního dovoleného posunu spojů se bude počet vozidel snižovat, což by mělo potvrdit hypotézu uvedenou v úvodní části práce. Hodnota maximálního dovoleného posunu bude v každém kroku zvětšena o 10 minut, ostatní hodnoty zůstanou nezměněny. Vzhledem k tomu, že již ve výše nastavených hodnotách maximálního dovoleného posunu stačí k obsluze pouze 2 vozidla, nedá se očekávat nějaký enormní pokles počtu použitých vozidel.

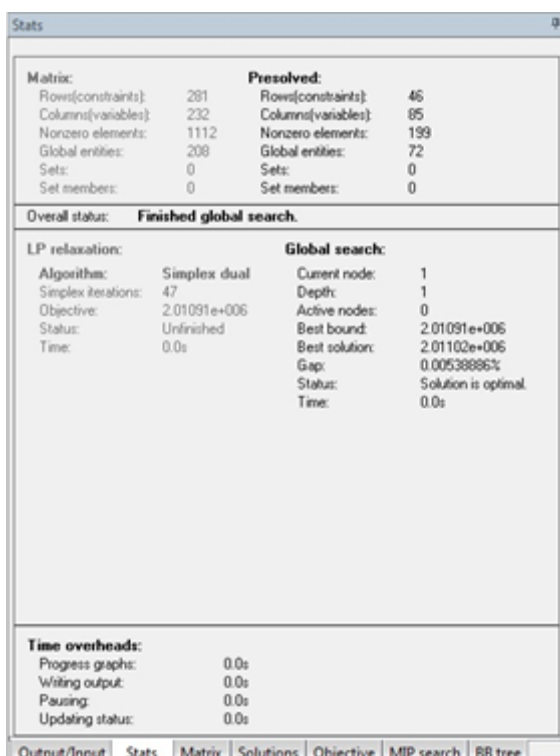
Vzhledem k rozsáhlosti textu programu, budou v této části uveřejněny již pouze změněné vstupní hodnoty a výsledné tabulky z programu Xpress-IVE.

aa: [20,20,20,20,20,20,20,50,20,36,20,20]

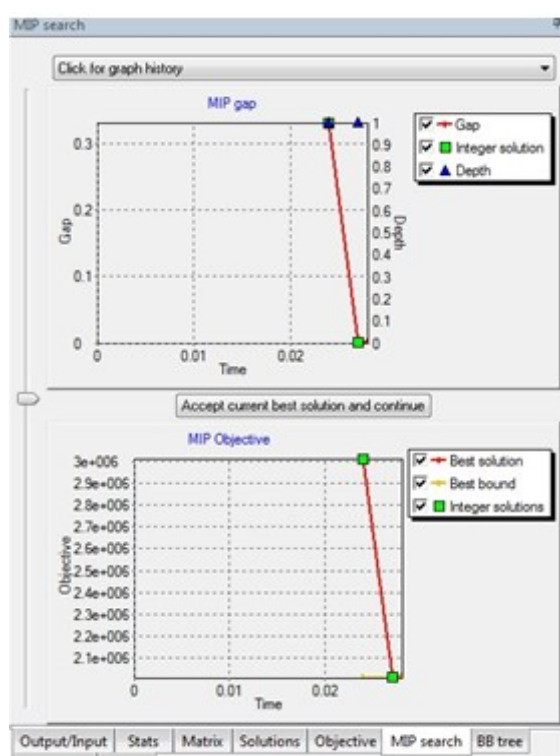
Výsledky optimalizačního výpočtu jsou shrnuty v tab. č. 7.6.

Tab. č. 7.6 Tabulka výsledků optimalizačního výpočtu

Posuny autobusových spojů [min]	Posuny vlakových spojů [min]	Vazby mezi spoji	Přejezd vozidla po obsluze spoje $i \in A$ k obsluze spoje $j \in A$
wa(1)=20	wv1(16)=0	z15(1,9)=1	x(0,6)=1
wa(2)=20	wv1(17)=0	z15(2,10)=1	x(0,11)=1
wa(3)=20	wv2(13)=0	z16(1,11)=1	x(1,9)=1
wa(4)=3	wv2(14)=0	z16(2,12)=1	x(2,10)=1
wa(5)=20	wv2(15)=0	z17(1,14)=1	x(3,7)=1
wa(6)=0		z17(2,15)=1	x(4,8)=1
wa(7)=11		z24(3,7)=1	x(5,4)=1
wa(8)=38		z24(4,8)=1	x(6,1)=1
wa(9)=13		z26(3,11)=1	x(7,2)=1
wa(10)=34		z26(4,12)=1	x(9,3)=1
wa(11)=11		z27(3,14)=1	x(10,12)=1
wa(12)=3		z27(4,15)=1	x(11,5)=1
		z34(5,8)=1	
		z35(5,10)=1	
		z37(5,15)=1	
		z84(16,7)=1	
		z84(17,8)=1	
		z85(16,10)=1	
		z85(17,10)=1	
		z86(16,11)=1	
		z86(17,12)=1	



Obr. 7.5 Nalezení optima - záložka Stats



Obr. 7.6 Průběh výpočtů - záložka MIP search

aa: [30,30,30,30,30,30,30,60,30,36,30,30]

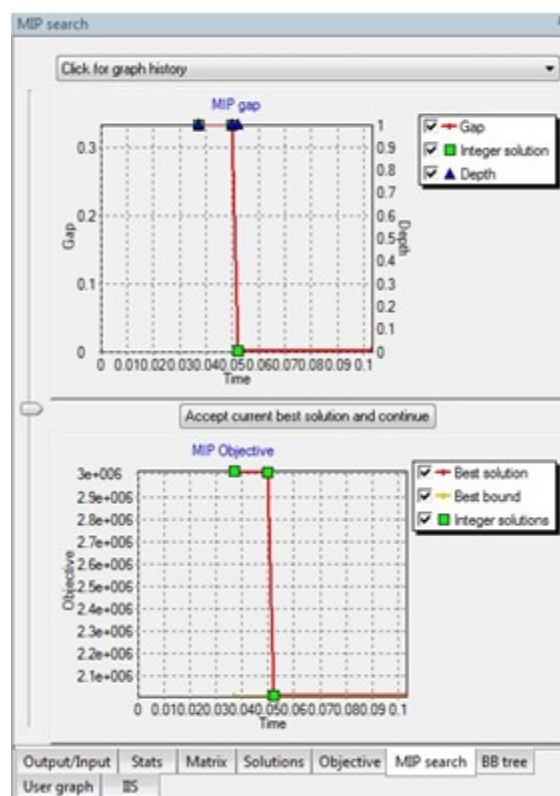
Tab. č. 7.7 Tabulka výsledků optimalizačního výpočtu – navýšení o 20 min

Posuny autobusových spojů [min]	Posuny vlakových spojů [min]	Vazby mezi spoji	Přejezd vozidla po obsluze spoje $i \in A$ k obsluze spoje $j \in A$
wa(1)=30	wv1(16)=0	z15(1,9)=1	x(0,6)=1
wa(2)=30	wv1(17)=0	z15(2,10)=1	x(0,11)=1
wa(3)=30	wv2(13)=0	z16(1,11)=1	x(1,9)=1
wa(4)=3	wv2(14)=0	z16(2,12)=1	x(2,10)=1
wa(5)=25	wv2(15)=0	z17(1,14)=1	x(3,7)=1
wa(6)=27		z17(2,15)=1	x(4,8)=1
wa(7)=21		z24(3,7)=1	x(5,4)=1
wa(8)=38		z24(4,8)=1	x(6,1)=1
wa(9)=23		z26(3,11)=1	x(7,2)=1

wa(10)=36		z26(4,12)=1	x(9,3)=1
wa(11)=30		z27(3,14)=1	x(10,12)=1
wa(12)=3		z27(4,15)=1	x(11,5)=1
		z34(5,8)=1	
		z35(5,10)=1	
		z37(5,15)=1	
		z84(16,7)=1	
		z84(17,8)=1	
		z85(16,10)=1	
		z85(17,10)=1	
		z86(16,11)=1	
		z86(17,12)=1	



Obr. 7.7 Nalezení optima - záložka Stats



Obr. 7.8 Průběh výpočtů - záložka MIP search

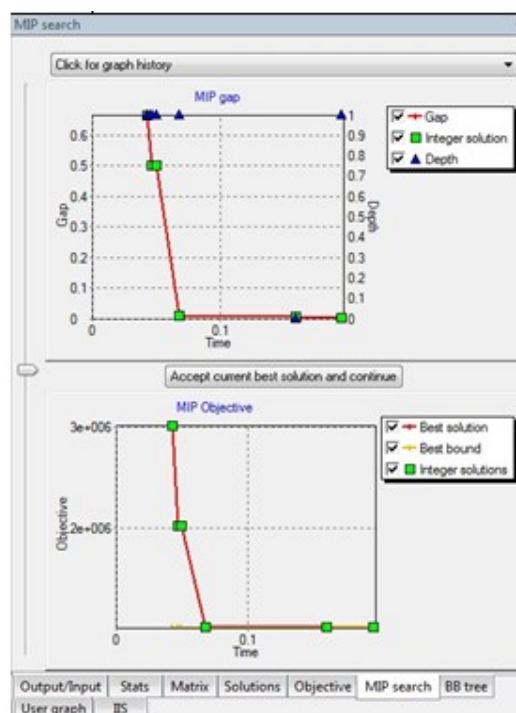
aa: [60,60,60,60,60,60,60,90,60,66,60,60]

Tab. č. 7.8 Tabulka výsledků optimalizačního výpočtu – navýšení o 50 min

Posuny autobusových spojů [min]	Posuny vlakových spojů [min]	Vazby mezi spoji	Přejezd vozidla po obsluze spoje $i \in A$ k obsluze spoje $j \in A$
wa(1)=60	wv1(16)=0	z15(1,9)=1	x(0,6)=1
wa(2)=22	wv1(17)=0	z15(2,10)=1	x(1,9)=1
wa(3)=38	wv2(13)=0	z16(1,11)=1	x(2,11)=1
wa(4)=3	wv2(14)=0	z16(2,11)=1	x(3,7)=1
wa(5)=36	wv2(15)=0	z17(1,14)=1	x(4,10)=1
wa(6)=57		z17(2,15)=1	x(5,4)=1
wa(7)=29		z24(3,7)=1	x(6,1)=1
wa(8)=65		z24(4,8)=1	x(7,2)=1
wa(9)=53		z26(3,11)=1	x(8,12)=1
wa(10)=63		z26(4,12)=1	x(9,3)=1
wa(11)=60		z27(3,14)=1	x(10,8)=1
wa(12)=51		z27(4,15)=1	x(11,5)=1
		z34(5,8)=1	
		z35(5,10)=1	
		z37(5,15)=1	
		z84(16,7)=1	
		z84(17,8)=1	
		z85(16,10)=1	
		z85(17,10)=1	
		z86(16,11)=1	
		z86(17,12)=1	



Obr. 7.9 Nalezení optima - záložka Stats



Obr. 7.10 Průběh výpočtů - záložka MIP search

7.5 Zhodnocení výsledků

Na základě údajů uvedených v tab. 7.8 je patrné, že dopolední sedlo v mikroregionu Rýmařovsko je schopné, po koordinaci spojů, obsloužit jedním navrženým oběhem. Jedno vozidlo postačí v případě, že bude umožněn maximální dovolený posun např. 60 minut.

Minimalizace počtu vozidel není jediným kritériem v této konkrétní optimalizační úloze. Další dvě kritéria (celková neproduktivně ujetá vzdálenost a celková časová ztráta) se vyvíjí v závislosti na hodnotě maximálního dovoleného posunu, viz. tabulka č. 7.8.

Tab. č. 7.8 Srovnání hodnot z hlediska všech kritérií

Hodnota maximálního dovoleného posunu [min]	Počet použitých vozidel [-]	Celková neproduktivně ujetá vzdálenost [km]	Celková časová ztráta [osobominuty]
10	2	21	11 550
20	2	21	10 500
30	2	21	9 450
40	2	27	8 200
50	2	21	7 350
60	1	27	10 210
70	1	27	9 780

Z tabulky je zřejmé, že s rostoucí hodnotou maximálního dovoleného posunu se snižuje hodnota celkové časové ztráty až do okamžiku, kdy se sníží počet použitých vozidel. Při snížení počtu vozidel dochází opět k nárůstu celkové časové ztráty, což odpovídá situaci, kdy jedno vozidlo musí obsloužit všechny spoje a logicky se znovu prodlouží doba čekání.

8 ZÁVĚR

Předložená diplomová práce si klade za cíl vytvořit matematický model, který je schopný pracovat současně na časové koordinaci spojů veřejné dopravy a oběžích vozidel. Optimalizačním kritériem bylo minimalizovat celkový počet nasazených vozidel, minimalizovat celkovou časovou ztrátu cestujících a minimalizovat celkovou neproduktivně ujetou vzdálenost.

Úvodní kapitoly popisují význam veřejné dopravy a faktory ovlivňující provozování veřejné dopravy. Následně je popsán matematický model, jehož funkčnost byla ověřena na výpočetních experimentech. Výpočty probíhaly v postačující demo verzi programu, která je volně dostupná na internetu. Během provádění výpočetních experimentů nebylo nutné řešit závažnější komplikace.

Klíčovou kapitolou diplomové práce je kapitola číslo 5, ve které je popsán navržený matematický model. Na základě provedených experimentů lze konstatovat, že model je funkční a lze jej transformovat do jakékoliv dopravní sítě a situace. Z hlediska doby výpočtu byly výpočty řešení téměř okamžité. Metody lineárního programování mají budoucnost a jednou možná nahradí tvůrce jízdních řádů.

9 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ČERNÝ, Jan; KLUVÁNEK, Pavol. *Základy matematickej teorie dopravy*. Bratislava: VEDA, 1991. 279 s. ISBN 80-224-0099-8.
- [2] PASTOR, Otto; TUZAR, Antonín. *Teorie dopravních systémů*. Praha: ASPI, 2007. 312 s. ISBN 978-80-7357-285-3.
- [3] JANÁČEK, Jaroslav. *Navrhovanie územne rozľahlých obslužných systémov*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2010. 404 s. ISBN 978-80-554-0219-2.
- [4] AZ MOBILITY [online]. [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://www.azmobility.cz/uvodni-slovo/>
- [5] Veřejná správa online [online]. [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://denik.obce.cz/clanek.asp?id=6662552>
- [6] TEICHMANN, Dušan. Studijní opory k modulu M14 – Optimalizace technologických procesů [online]. [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: http://issuu.com/michdor/docs/m14_text
- [7] Veřejná správa online [online]. [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://denik.obce.cz/clanek.asp?id=6677587>
- [8] Integrovaný dopravní systém Moravskoslezského kraje [online]. [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://www.kodis.cz>
- [9] Obrázek rozdělení hromadné dopravy [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Doprava>
- [10] Mapa správního uspořádání ČR k 31.1.2015 [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://portal.uur.cz/images/mapy/03-mapa-cr-orp-2015.jpg>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Rozdělení hromadné dopravy [9]	11
Obr. 3.1 Mapa správního uspořádání ČR k 31.1.2015 [10].....	17
Obr. 3.2 Mapa mikroregionu s vyznačením rozhodující silniční sítě [8]	18
Obr. 3.2 Zóny Integrovaného dopravního systému Moravskoslezského kraje [8]	21
Obr. 4.1 Struktura software Xpress-IVE	25
Obr. 6.1 Výsledek výpočtu – záložka Output/Input	42
Obr. 6.2. Nalezení optima – záložka Stats	42
Obr. 6.3. Průběh výpočtu – záložka MIP search	42
Obr. 6.4 Dopravní síť	43
Obr. 6.5 Nalezení optima – záložka Stats	51
Obr. 6.6 Průběh výpočtu – záložka MIP search	51
Obr. 7.2 Nalezení optima - záložka Stats	63
Obr. 7.3 Průběh výpočtů - záložka MIP search	63
Obr. 7. 4a Oběh vozidla č. 1	64
Obr. 7. 4b Oběh vozidla č. 2	65
Obr. 7.5 Nalezení optima - záložka Stats.....	67
Obr. 7.6 Průběh výpočtů - záložka MIP search	67
Obr. 7.7 Nalezení optima - záložka Stats.....	68
Obr. 7.8 Průběh výpočtů - záložka MIP search	68
Obr. 7.9 Nalezení optima - záložka Stats.....	70
Obr. 7.10 Průběh výpočtů - záložka MIP search	70

SEZNAM TABULEK

Tab. č. 3.1 Počty autobusových spojů na linkách obsluhujících mikroregion.....	20
Tab. č. 6.1: Časy odjezdů z výchozí zastávky a intenzity přestupujících cestujících.....	39
Tab. č. 6.2 Nejdříve možné odjezdy vlaků z koordinačního uzlu 1 a 2.....	39
Tab. č. 6.3 Vstupní údaje pro výpočetní experiment	44
Tab. č. 6.4 Výsledky optimalizačního výpočtu	49
Tab. č. 7.1 Výpis linek, jejichž výchozí zastávkou je Rýmařov aut. zast. v době od 8- 12 hod [8]	52
Tab. č. 7.2 Výpis linek, jejichž cílovou zastávkou je Rýmařov aut. zast. v době od 8- 12 hod [8]	53
Tab. č. 7.3 Podklady pro výpočet	55
Tab. č. 7.4 Výsledky optimalizačního výpočtu	62
Tab. č. 7.5 Časová koordinace spojů	63
Tab. č. 7.6 Tabulka výsledků optimalizačního výpočtu	66
Tab. č. 7.7 Tabulka výsledků optimalizačního výpočtu – navýšení o 20 min.....	67
Tab. č. 7.8 Tabulka výsledků optimalizačního výpočtu – navýšení o 50 min.....	69
Tab. č. 7.8 Srovnání hodnot z hlediska všech kritérií.....	71